



Departamento  
de Engenharia Eletrotécnica

---

# **Análise Técnico-Económica de um Dispositivo Eletrónico para Melhoria do Desempenho de Motores de Indução Trifásicos**

Trabalho de Projeto apresentado para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Eletrotécnica – Área de Especialização Automação e  
Comunicações em Sistemas de Industriais

**Autor**

**José Eduardo dos Santos Guarino Simões**

**Orientador**

**Professor Doutor Fernando José Teixeira Estêvão Ferreira**

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Coimbra, junho 2015**



## AGRADECIMENTOS

Não faria sentido começar estes singelos, mas muito sinceros, agradecimentos por outra pessoa que não o Professor Doutor *Fernando Ferreira* por todo o apoio e auxílio prestados não só durante a realização deste trabalho de projeto mas sim no decorrer de todo o meu percurso académico.

Tal como o Professor Doutor *Fernando Ferreira* também o Professor Doutor *Vítor Santos* merece, da minha parte, um enorme muito obrigado pois, não sendo meu orientador nem tendo qualquer obrigação e/ou dever, prontificou-se a ler o meu trabalho de projeto, tecendo os seus comentários e críticas construtivas, que eu muito agradeço por tanto me ajudarem a crescer e evoluir.

Um obrigado também à minha irmã que me ajudou na realização deste trabalho. Assim como à minha namorada por toda a ajuda prestada, as palavras de força e os olhares de incentivo. Aos meus pais e à minha madrinha um obrigado especial, mais do que pelo apoio e ajuda, por terem sido um pilar firme e seguro.

Por fim, mas não menos importante, aos meus colegas de equipa do projeto *InSwitch* – David Apóstolo, Miguel Oliveira e Ricardo Ferreira – sem os quais este projeto não seria possível. Agradeço-lhes ainda a amizade e todo o contributo que deram para a realização destes meus dois projetos.

A todos os que me acompanharam durante este percurso um sincero obrigado, especialmente por todo o apoio, incentivo e paciência.



## RESUMO

O presente trabalho de projeto tem por base um dispositivo eletrónico inovador, robusto, compacto e autoalimentado. A sua instalação é simples e rápida e pode ser fabricado de forma fácil e barata. O módulo de potência é constituído por tirístores/TRIACs, que funcionam como interruptores bidirecionais, para minimizar perdas internas, com *zero crossing* de tensão para permitir minimizar os transitórios na mudança do tipo de ligação do motor. O dispositivo é instalado dentro da caixa de terminais dos motores de indução trifásicos, libertando algum espaço nos quadros elétricos e permitindo obter poupanças de energia, assim como realizar arranques estrela-triângulo. A melhoria do desempenho do motor é conseguido através da alteração automática do tipo de ligação dos enrolamentos estatóricos, em função do nível de carga, que tem como efeito final a otimização do seu fluxo.

Por ser instalado dentro da caixa de terminais do motor permite substituir 2 dos 3 contactores e eliminar 3 dos 6 cabos de alimentação do motor, tipicamente necessários em arrancadores estrela-triângulo. Os componentes que se substituem/eliminam nestes arrancadores são mais dispendiosos do que o preço estimado por unidade do dispositivo proposto. Em novas aplicações, estas alterações traduzem-se num investimento virtualmente nulo. Em comparação com os tradicionais contactores eletromecânicos, e uma vez que o dispositivo é constituído por tecnologia de estado sólido (não possui partes móveis), é potencialmente mais fiável.

Atualmente, com base no protótipo funcional, o dispositivo pode ser instalado em motores de indução trifásicos, com rotor em gaiola de esquilo de 2/4/6/8 polos com potências compreendidas entre os 4 kW e 7,5 kW, com aumentos de rendimento acima dos 20% pontos percentuais para cargas inferiores a 20% em motores de 7,5 kW.

Este dispositivo tem como concorrência os arrancadores estrela-triângulo, os arrancadores eletrónicos e os reguladores de tensão. Tendo por base o mercado dos convencionais arrancadores estrela-triângulo estima-se um mercado potencial mundial, em 2015, superior a 1000000 unidades/ano só na europa, e superior a 500000 unidades/ano em África e Brasil.

Refira-se que foi feito um estudo de mercado através de um inquérito *online*, direcionado às empresas do setor industrial, revelando um elevado interesse na instalação do dispositivo proposto, estando grande parte dos inquiridos dispostos a pagar até 300 € por unidade, para potências até 30 kW.

**Palavras-Chave:** Dispositivo Eletrónico, Motor de Indução Trifásico, Arranque Estrela-Triângulo, Desempenho do Motor, Retorno do Investimento, Mercado Potencial.



## ABSTRACT

This Project Report is based on a novel robust, compact and self-powered electronic device. Its installation is simple and fast and it can be easily and inexpensively manufactured. The power module integrates thyristors/TRIACs, operating as bidirectional switches at zero voltage crossing in order to minimize the internal losses and the motor connection mode change switching transients. The concept of the device allows it to be installed inside the terminal box of variable load three-phase induction motors, freeing-up some space in the electrical/switchgear cabinets/boards allowing to obtain energy savings, as well as to perform star-delta starters. The motor performance improvement is achieved by automatically changing the connection mode of the stator windings, as a function of the actual load level, which ultimately results in an optimization of its magnetization.

Because it can be installed inside the motor terminal box the proposed technology allows the replacement two of the three traditional contactors and eliminate three of the six cables of the motor supply, typically required in star-delta starters. The components that were replaced/eliminated of these starters are more expensive than the estimated per-unit price of proposed device. For new applications, these changes lead a payback virtually zero. In comparison with traditional electromechanical contactors, being a fully solid state electronic device (no moving parts), it is potentially more reliable.

Presently, on the basis of the up-to-date developments, it can be applied in low-voltage 2/4/6/8 pole, squirrel-cage induction motors with rated power from 4 kW to 7,5 kW with increments above yields of 20 percentage points for loads of less than 20% of 7,5 motors.

This device can compete with conventional start-delta starters, soft-starters and voltage regulators. Based on the market for conventional start-delta starters, the estimated global potential market, in 2015, is more the 1000000 units/year only in Europe and more than 5000000 units/year in Africa and Brazil.

A market study was carried out through an online survey, targeted to large industrial companies, showing a high interest in the proposed device, with most of the answers willing to pay up to € 300 per unit to a power up to 30 kW.

**Keywords:** Electronic Device, Three-Phase Induction Motor, Star-Delta Starter, Motor Efficiency, Payback, Potential Market.





# ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>iii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>xix</b>
<b>ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS.....</b>	<b>xxi</b>
<b>SIMBOLOGIA .....</b>	<b>xxiii</b>
<b>Capítulo 1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 IMPORTÂNCIA DO DISPOSITIVO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 TENDÊNCIAS EUROPEIAS.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 ENQUADRAMENTO DO DISPOSITIVO PROPOSTO.....</b>	<b>6</b>
<b>1.4 MOTIVAÇÕES.....</b>	<b>9</b>
<b>1.5 OBJETIVOS.....</b>	<b>10</b>
<b>1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO DE PROJETO .....</b>	<b>10</b>
<b>Capítulo 2 ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 MOTORES ELÉTRICOS.....</b>	<b>13</b>
2.1.1 Motor de indução trifásico.....	14
2.1.2 Características principais.....	18
2.1.3 Características dos motores.....	19
<b>2.2 CONTACTORES vs. SSRs .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3 LEGISLAÇÃO.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4 TIPOS DE ARRANQUES DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS COM ROTOR EM</b>	
<b>GAIOLA DE ESQUILO .....</b>	<b>27</b>
2.4.1 Arranque direto .....	27
2.4.2 Arranque estrela-triângulo .....	28
2.4.3 Arranque com arrancador eletrónico .....	31
2.4.4 Arranque com variador eletrónico de velocidade .....	34
2.4.5 Arranque com autotransformador.....	37
2.4.6 Arranque com SinuMEC.....	38

2.4.7	Arranque com enrolamentos parciais .....	39
2.4.8	Arranque com bobine em série com o motor .....	40
2.4.9	Arranque com banco de condensadores .....	41
<b>Capítulo 3</b>	<b>DISPOSITIVO .....</b>	<b>43</b>
3.1	CONCEITO .....	44
3.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO .....	47
3.3	ESTRUTURA DO DISPOSITIVO .....	49
<b>Capítulo 4</b>	<b>SIMULAÇÕES DO SISTEMA PROPOSTO .....</b>	<b>57</b>
4.1	SOFTWARE DE SIMULAÇÃO .....	57
4.2	ENSAIOS EM VAZIO E CURTO-CIRCUITO .....	58
4.2.1	Ensaio em Vazio .....	58
4.2.2	Ensaio em Curto-Circuito (rotor travado) .....	60
4.3	ENSAIOS EM REGIME PERMANENTE .....	62
<b>Capítulo 5</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>65</b>
5.1	MATERIAL UTILIZADO NOS ENSAIOS .....	65
5.2	MOTOR IE2 DE 4 kW .....	66
5.3	MOTOR IE2 DE 7,5 kW .....	67
5.4	MOTOR IE3 DE 7,5 kW .....	68
5.5	POUPANÇAS DIRETAS .....	70
5.6	POUPANÇAS INDIRETAS .....	76
5.7	ANÁLISE DE PAYBACK .....	79
<b>Capítulo 6</b>	<b>ESTUDO DE MERCADO .....</b>	<b>91</b>
6.1	CONCORRÊNCIA .....	91
6.1.1	Contactores eletromecânicos .....	91
6.1.2	Arrancador eletrónico .....	91
6.1.3	SinuMEC .....	92
6.2	DIMENSÃO DO MERCADO .....	92
6.3	DISPOSITIVO PROPOSTO vs. CONCORRÊNCIA .....	94
6.4	MERCADO POTENCIAL .....	99
6.5	ESTUDO DE MERCADO .....	103
<b>Capítulo 7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>107</b>
7.1	CONCLUSÕES .....	107
7.2	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....	112
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>.....</b>	<b>115</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Aspeto típico de um motor trifásico com rotor em gaiola de esquilo [4].....	1
Figura 1.2 – Custos do ciclo de vida dos motores [7].....	2
Figura 1.3 – Fator de carga no setor industrial e terciário da EU, por gama de potência [11] .	2
Figura 1.4 – Rendimento e fator de potência obtidos experimentalmente, em função da carga, para um MITG tetrapolar de 7,5 kW, classe IE4 .....	3
Figura 1.5 – Rendimento nominal de motores tetrapolares de classe de eficiência IE1, IE2, IE3 e IE4, por potência nominal [12] .....	4
Figura 1.6 – <i>Timeline</i> imposta pela legislação para a transição da classe de eficiência dos motores elétricos [9] .....	5
Figura 1.7 – Redução do custo de vida do motor IE2 e IE3 em comparação com motor IE1 [9] .....	5
Figura 1.8 – Comparação de eficiência de uma aplicação de velocidade constante, diretamente alimentada da rede, com variador eletrónico de velocidade [7] .....	7
Figura 1.9 – Exemplo de uma aplicação com velocidade fixa [9].....	7
Figura 1.10 – Perfil de carga da aplicação do exemplo apresentada anteriormente [9] .....	8
Figura 1.11 – Diagrama de carga típico de uma grua [13] .....	9
Figura 2.1 – Evolução estimada do numero de motores de indução trifásicos instalados no setor industrial e terciário da EU-15, com base nos anos anteriores [11].....	13
Figura 2.2 – Caraterização dos motores elétricos [11] .....	14
Figura 2.3 – Percentagem de venda de motores e geradores elétricos na UE-27 em 2012 [14] .....	14
Figura 2.4 – Partes constituintes do MITG [15]. .....	15
Figura 2.5 – Motor de indução trifásico com rotor em gaiola de esquilo [11]. .....	15
Figura 2.6 – Estator do motor AC [11] .....	16
Figura 2.7 – Rotor em gaiola de esquilo [11] .....	16
Figura 2.8 – Resumo do princípio de funcionamento de um MITG [17].....	17

Figura 2.9 – Curvas características de um motor trifásico assíncrono ( $I_A$ – Corrente de arranque; $I_N$ – Corrente nominal; $M_A$ – Binário de arranque; $M_B$ – Binário de aceleração; $M_K$ – Binário máximo; $M_L$ – Binário da carga; $M_N$ – Binário do motor; $n$ – Velocidade; $n_N$ – Velocidade nominal; $n_S$ – Velocidade de sincronismo) [6].....	18
Figura 2.10 – Distribuição típica das perdas no motor de indução, em função da carga [11] .....	22
Figura 2.11 – Aspeto típico de um contactor [20] .....	23
Figura 2.12 – Aspeto típico dos SSRs [23].....	24
Figura 2.13 – Diagrama de controlo de cargas trifásicas com SSRs [22] .....	24
Figura 2.14 – Esquema do arranque direto do motor de indução trifásico [6].....	28
Figura 2.15 – Esquemático do arranque estrela-triângulo do motor de indução trifásico [6].	30
Figura 2.16 – Curvas típicas de corrente e de binário do arranque estrela-triângulo ( $I$ – Corrente do motor; $I_e$ – Corrente nominal; $M_A$ – Binário em triângulo; $M_Y$ – Binário em estrela; $n$ – Velocidade; $n_S$ – Velocidade de sincronismo; $M_L$ – Binário da carga; $I_A$ – Corrente em triângulo; $I_Y$ – Corrente em estrela; $I_{AT}$ – Corrente estrela-triângulo) [5].....	30
Figura 2.17 – Diferentes modos de ligação de um <i>soft-starter</i> [6]. .....	32
Figura 2.18 – Esquemático do arranque com <i>soft-starter</i> do motor de indução trifásico [6].	32
Figura 2.19 – Esquemático da configuração em triângulo do arranque com <i>soft-starter</i> do motor de indução trifásico [6].....	32
Figura 2.20 – Comparação das curvas de corrente e binário dos arranques direto, estrela-triângulo e com arrancador suave eletrónico [27].....	33
Figura 2.21 – Curva de tensão num <i>soft-starter</i> [6].....	33
Figura 2.22 – Forma de onda da tensão de alimentação do motor com o controlo do ângulo de fase por <i>soft-starter</i> [5].....	34
Figura 2.23 – Esquemático do arranque com variador eletrónico de velocidade (VEV) de um MITG [6].....	35
Figura 2.24 – Esquema do retificador trifásico e monofásico [5].....	36
Figura 2.25 – Esquema do barramento DC [5] .....	37
Figura 2.26 – Esquema do inversor [5].....	37
Figura 2.27 – Esquemático do arranque com auto-transformador do MITG [27].....	38

Figura 2.28 – Comparação do SinuMec com o <i>soft-starter</i> [28].	39
Figura 2.29 – Tipos de ligação do SinuMec [28].	39
Figura 2.30 – Esquemático do arranque com enrolamentos parciais do motor <i>Dhalander</i> [5]	40
Figura 2.31 – Esquemático do arranque com bobine em série do motor de indução trifásico [25].	40
Figura 2.32 – Esquemático do arranque com condensador de arranque do motor de indução trifásico [25].	41
Figura 3.1 – Rendimento e fator de potência obtidos experimentalmente, em função da carga, para um motor tetrapolar de 3 kW.	44
Figura 3.2 – Aspeto final pretendido do dispositivo proposto.	45
Figura 3.3 – Instalação do dispositivo proposto num MITG.	45
Figura 3.4 – Alteração no esquema de um sistema de arranque Y/D com a utilização do dispositivo proposto	46
Figura 3.5 – Caixa de terminais de um motor de indução trifásico com rotor em gaiola de esquilo com os seis terminais acessíveis.	47
Figura 3.6 – Medidas experimentais de rendimento, fator de potência e corrente de fase (p.u.) para um motor de indução trifásico tetrapolar de 3kW, 400V, 50 Hz	48
Figura 3.7 – Medidas experimentais de rendimento, fator de potência e corrente de fase (p.u.) para um motor de indução trifásico tetrapolar de 3kW, 400V, 50 Hz com alteração do modo de ligação dos enrolamentos estatóricos, em função da carga aplicada	48
Figura 3.8 – Dispositivo proposto dentro da caixa de terminais de um motor de 4 kW classe IE2.	49
Figura 3.9 – PCB do protótipo do dispositivo proposto.	50
Figura 3.10 – Fonte de alimentação do dispositivo proposto	51
Figura 3.11 – Diagrama esquemático do circuito do sensor ACS712 e o sensor [29]	51
Figura 3.12 – Diagrama esquemático do circuito do sensor de tensão.	52
Figura 3.13 – Placa de circuito impresso do microcontrolador	52
Figura 3.14 – Fluxograma do programa do microcontrolador.	54

Figura 3.15 – Ligação em estrela dos enrolamentos estatóricos com o dispositivo proposto	55
Figura 3.16 – Ligação em triângulo dos enrolamentos estatóricos com o dispositivo proposto	55
Figura 4.1 – Janela de parametrização do elemento <i>Squirrel-cage Induction Machine</i> do <i>PSIM</i> .	58
Figura 4.2 – Esquema equivalente por fase do motor de indução trifásico	58
Figura 4.3 – Modelização do ensaio em vazio do motor de 4 kW da Universal Motors	60
Figura 4.4 – Modelização do ensaio em curto-circuito do motor de 4 kW	62
Figura 4.5 – Diagrama de carga utilizado para estudo no simulador <i>PSIM</i>	62
Figura 4.6 – Modelização do dispositivo proposto a gerir o tipo de ligação do motor de indução modelizado, em função do nível de carga.	63
Figura 4.7 – Modelização da eletrónica de potência	63
Figura 4.8 – Modelização do <i>zero-crossing</i> embebido nos <i>drivers</i> de controlo dos triacs	63
Figura 4.9 – Rendimento e fator de potência do motor modelizado diretamente alimentado da rede e com o dispositivo proposto	64
Figura 4.10 – Aumento em pontos percentuais do rendimento e fator de potência para nível de carga expresso no diagrama de carga	64
Figura 5.1 – Bancada de testes utilizada (ISR-UC)	65
Figura 5.2 – Melhoria de rendimento e de fator de potência em função do nível de carga para a ligação estrela e triângulo, do motor tetrapolar de 4 kW, classe IE2	67
Figura 5.3 – Melhoria do rendimento e do fator de potência em função do nível de carga para a ligação estrela e triângulo, do motor tetrapolar de 7,5 kW, classe IE2	68
Figura 5.4 – Melhoria do rendimento e do fator de potência em função do nível de carga para a ligação estrela e triângulo, do motor tetrapolar de 7,5 kW, classe IE3	70
Figura 5.5 – Poupanças estimadas para um motor de 4 kW, IE2 instalado numa instalação alimentada MT por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa	73
Figura 5.6 – Poupanças estimadas para um motor de 7,5 kW, IE2 instalado numa instalação alimentada MT por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa	74

Figura 5.7 – Poupanças estimadas para um motor de 7,5 kW, IE3 instalado numa instalação alimentada MT por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa.....	74
Figura 5.8 – Poupanças estimadas para um motor de 4 kW, IE2 instalado numa instalação alimentada BTE por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa. ....	75
Figura 5.9 – Poupanças estimadas para um motor de 7,5 kW, IE2 instalado numa instalação alimentada BTE por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa. ....	75
Figura 5.10 – Poupanças estimadas para um motor de 7,5 kW, IE3 instalado numa instalação alimentada BTE por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa. ....	76
Figura 5.11 – Esquema equivalente por fase de um transformador [36] .....	78
Figura 5.12 – Curvas de rendimento do transformador em função da corrente absorvida [36]. .....	79
Figura 5.13 – Tempo de retorno do investimento adicional em função do nível de carga para um motor de 4 kW de classe IE2, numa instalação alimentada à MT, para diferentes tempos de operação em carga baixa (em horas/ano). ....	80
Figura 5.14 – Tempo de retorno do investimento adicional em função do nível de carga para um motor de 7,5 kW de classe IE2, numa instalação alimentada à MT, para diferentes tempos de operação em carga baixa (em horas/ano). ....	81
Figura 5.15 – Tempo de retorno do investimento adicional em função do nível de carga para um motor de 7,5 kW de classe IE3, numa instalação alimentada à MT, para diferentes tempos de operação em carga baixa (em horas/ano). ....	81
Figura 5.16 – Tempo de retorno do investimento adicional em função do nível de carga para um motor de 4 kW de classe IE2, numa instalação alimentada à BTE, para diferentes tempos de operação em carga baixa (em horas/ano). ....	82
Figura 5.17 – Tempo de retorno do investimento adicional em função do nível de carga para um motor de 7,5 kW de classe IE2, numa instalação alimentada à BTE, para diferentes tempos de operação em carga baixa (em horas/ano). ....	82
Figura 5.18 – Tempo de retorno do investimento adicional em função do nível de carga para um motor de 7,5 kW de classe IE3, numa instalação alimentada à BTE, para diferentes tempos de operação em carga baixa (em horas/ano). ....	83
Figura 5.19 – Tempo de retorno do investimento para um motor de 4 kW, IE2 instalado numa instalação alimentada à MT por número de horas de funcionamento anuais em carga	

baixa, tendo em conta uma diminuição do custo com compensação de fator de potência .....	86
Figura 5.20 – Tempo de retorno do investimento para um motor de 7,5 kW, IE2 instalado numa instalação alimentada à MT por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa, tendo em conta uma diminuição do custo com compensação de fator de potência .....	86
Figura 5.21 – Tempo de retorno do investimento para um motor de 7,5 kW, IE3 instalado numa instalação alimentada à MT por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa, tendo em conta uma diminuição do custo com compensação de fator de potência .....	87
Figura 5.22 – Tempo de retorno do investimento para um motor de 4 kW, IE2 instalado numa instalação alimentada à BTE por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa, tendo em conta uma diminuição do custo com compensação de fator de potência .....	87
Figura 5.23 – Tempo de retorno do investimento para um motor de 7,5 kW, IE2 instalado numa instalação alimentada à BTE por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa, tendo em conta uma diminuição do custo com compensação de fator de potência .....	88
Figura 5.24 – Tempo de retorno do investimento para um motor de 7,5 kW, IE3 instalado numa instalação alimentada à BTE por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa, tendo em conta uma diminuição do custo com compensação de fator de potência .....	88
Figura 5.25 – Comparação TRI considerando ou não considerando uma redução do custo da compensação do fator de potência por via da redução do consumo de energia reativa do MITG instalado numa instalação alimentada à MT. ....	89
Figura 5.26 – Comparação TRI considerando ou não considerando uma redução do custo da compensação do fator de potência por via da redução do consumo de energia reativa do MITG instalado numa instalação alimentada à BTE. ....	90
Figura 6.1 – Estimativa do mercado dos arrancadores eletromecânicos na UE-27 em 2012 [14]. .....	91
Figura 6.2 – Estimativa do mercado dos <i>soft-starters</i> na UE-27 em 2012 [14]. ....	92



Figura 6.3 – Estimativa do número de motores de indução trifásicos vendidos na UE-27 em 2010 [14].....	93
Figura 6.4 – Estimativa do mercado dos VEVs na UE-27 em 2012 [14].....	94
Figura 6.5 – Mercado dos arrancadores suaves (EU-27, 2012) [11, 14] .....	95
Figura 6.6 – Mercado dos arrancadores estrela-triângulo, segundo um fabricante [37].....	96
Figura 6.7 – Posicionamento (volume) do dispositivo proposto em relação a outras tecnologias para regulação de fluxo em regime permanente de MITG (assumindo que se usa um controlador eletrónico para os contactores Y/D). .....	96
Figura 6.8 – Posicionamento (custo) do dispositivo proposto em relação a outras tecnologias para regulação de fluxo em regime permanente de MITG (assumindo que se usa um controlador eletrónico para os contactores Y/D). .....	97
Figura 6.9 – Posicionamento (volume) do dispositivo proposto em relação a outras tecnologias para arranque suave de MITG.....	98
Figura 6.10 – Posicionamento (custo) do dispositivo proposto em relação a outras tecnologias para arranque suave de MITG.....	98
Figura 6.11 – Percentagem de arrancadores eletromecânicos (de um só fabricante) na Europa [37].....	100
Figura 6.12 – Quota de mercado dos arrancadores estrela-triângulo (< 10 kW) por receitas na Europa em 1998 [37] .....	100
Figura 6.13 – Quota de mercado dos arrancadores estrela-triângulo (10 - 100 kW) por receitas na Europa em 1998 [37].....	101
Figura 6.14 – Consumo de energia e emissões de CO <sub>2</sub> a nível mundial em 2006 [38].....	102
Figura 6.15 – Consumo de eletricidade na UE-28, Brasil e África [39].....	103
Figura 6.16 – Respostas obtidas à pergunta nº 1.....	104
Figura 6.17 – Respostas obtidas à pergunta nº 2.....	105
Figura 6.18 – Respostas obtidas à pergunta nº3.....	105



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 – Comparação de eficiência de uma aplicação industrial de velocidade constante com e sem variador eletrónico de velocidade. [7] .....	7
Tabela 1.2 – Consumo de energia anual de uma correia transportadora de 37 kW com o perfil de carga apresentado na Figura 1.10. [9] .....	8
Tabela 2.1 – Circuitos de conexão do motor [6] .....	19
Tabela 2.2 – Corrente de arranque máxima de motores alimentados diretamente da rede de distribuição (pública) [26].....	25
Tabela 2.3 – Potência máxima (kW) estipulada dos motores alimentados diretamente por uma rede de distribuição (pública) [26] .....	26
Tabela 2.4 – Constituição de um variador eletrónico de velocidade [6] .....	36
Tabela 4.1 – Valores obtidos no ensaio experimental em vazio do motor de 4 kW.....	59
Tabela 4.2 – Valores obtidos no ensaio experimental em curto-circuito do motor de 4 kW.....	60
Tabela 4.3 – Distribuição das reatâncias de fugas nos motores de indução [18].....	61
Tabela 5.1 – Chapa de características do motor tetrapolar de 4 kW, classe IE2 da <i>Universal Motors</i> .....	66
Tabela 5.2 – Chapa de características do motor tetrapolar de 7,5 kW, classe IE2 da WEG ..	67
Tabela 5.3 – Chapa de características do motor tetrapolar de 7,5 kW, classe IE3 da WEG ..	69
Tabela 5.4 – Tarifa transitória de venda a clientes finais em MT [34].....	71
Tabela 5.5 – Tarifa transitória de venda a clientes finais em BTE [34] .....	72
Tabela 5.6 – Escalões de faturação de energia reativa indutiva [35] .....	72
Tabela 6.1 – Número de VEVs, <i>Soft-Starters</i> e Arrancadores Eletromecânicos vendidos (milhares) e receita (milhões €) por gama de potência (EU-27,2012) [14].....	94
Tabela 6.2 – Comparação entre o dispositivo proposto e os dispositivos concorrentes no mercado.....	95
Tabela 6.3 – Perguntas constituintes do inquérito <i>online</i> . .....	104



## ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

UE	União Europeia
MITG	Motor de Indução Trifásico com Rotor em Gaiola de Esquilo
EC	<i>European Commission</i>
p.u.	Por Unidade
IE1	<i>Standard Efficiency</i>
IE2	<i>High Efficiency</i>
IE3	<i>Premium Efficiency</i>
IE4	<i>Super Premium Efficiency</i>
CE	Comissão Europeia
CEMEP	<i>European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ErP/EuP	<i>Energy using Product</i>
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
VEV	Variador Eletrónico de Velocidade
DOL	<i>Direct on Line</i>
VSD	<i>Variable Speed Drive</i>
DC	<i>Direct Current</i>
AC	<i>Alternating Current</i>
RPM	Rotações Por Minuto
L <sub>1</sub>	Fase um
L <sub>2</sub>	Fase dois
L <sub>3</sub>	Fase três
SSR	<i>Solid State Relay</i>
SW <sub>1</sub>	<i>Switch 1</i>
SW <sub>2</sub>	<i>Switch 2</i>
SW <sub>3</sub>	<i>Switch 3</i>
RTIEBT	Regras Técnicas de Instalações Elétricas de Baixa Tensão

---

HVAC	<i>Heating, Ventilating and Air Conditioning</i>
RFI	<i>Radio Frequency Interference</i>
EMC	<i>EletroMagnetic Compatibility</i>
IGBT	<i>Insulated-Gate Bipolar Transistor</i>
PWM	<i>Pulse-width modulation</i>
ADC	<i>Analogue to digital converter</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i>
MT	Média Tensão
BTE	Baixa Tensão Especial
TRI	Tempo de Retorno do Investimento
C.E.R.	Custo da Energia Reativa
CMA	Crescimento Médio Anual
EDP	Energias de Portugal
PPEC	Plano de Promoção de Eficiência no Consumo
LSPM	<i>Line Start Permanent Magnet Motors</i>

## SIMBOLOGIA

Símbolo	Descrição	Unidades
$P$	Potência Ativa	W
$f$	Frequência	Hz
$n$	Velocidade	Rad/s ou RPM
$s$	Deslizamento	-
$I$	Corrente	A
$M$ ou $T$	Binário	N.m
$U$ ou $V$	Tensão	V
$dv/dt$	Taxa de variação da tensão	V/s
$di/dt$	Taxa de variação da corrente	A/s
$R$	Resistência	$\Omega$
$T$	Tempo	s
$\delta$	Ângulo de disparo	°
$L$	Indutância	H
$C$	Capacitância	F
$Z$	Impedância	$\Omega$
$u$	Valor instantâneo de tensão	V
$i$	Valor instantâneo de corrente	A
$FP$ ou $\cos \Phi$	Fator de potência	-
$\Phi$	Ângulo de defasamento entre as componentes fundamentais da tensão e da corrente	°
$S$	Potência aparente	VA
$Q$	Potência reativa	var
$\Delta U$	Queda de tensão	V
$p$	Pares de pólos	-
$n_s$	Velocidade de sincronismo	Rad/s ou RPM
$I_A$	Corrente de arranque	A
$I_N$	Corrente nominal	A
$M_A$	Binário de arranque	N.m

$M_B$	Binário de Aceleração	N.m
$M_K$	Binário máximo	N.m
$M_L$	Binário da carga	N.m
$M_N$	Binário do motor	N.m
$n_N$	Velocidade nominal	rad/s ou RPM
$I_{LN}$	Corrente de linha	A
$I_W$	Corrente de fase	A
$U_{LN}$	Tensão de linha	V
$U_W$	Tensão de fase	V
$U_N$	Tensão nominal	V
$I_{ST}$	Corrente de arranque à tensão nominal	A
$U_1$	Terminal um do enrolamento U	-
$U_2$	Terminal dois do enrolamento U	-
$W_1$	Terminal um do enrolamento W	-
$W_2$	Terminal dois do enrolamento W	-
$V_1$	Terminal um do enrolamento V	-
$V_2$	Terminal dois do enrolamento V	-
$PE$	Neutro	-
$I'$	Corrente de fase na ligação triângulo	A
$I''$	Corrente de linha na ligação triângulo	A
$I'''$	Corrente de fase e linha na ligação estrela	A
$T'_a$	Binário na ligação em triângulo	N.m
$T''_a$	Binário na ligação em estrela	N.m
$Y$	Ligação dos enrolamentos estatóricos em estrela	-
$D$ ou $\Delta$	Ligação dos enrolamentos estatóricos em triângulo	-
$I_{STR}$	Corrente de arranque a uma tensão reduzida	A
$U_M$	Tensão aos terminais do motor	V
$U_{Start}$	Tensão reduzida de arranque	V
$U_{eff}$	Tensão eficaz	V
$T_{Start}$	Tempo de arranque	s



$T_{Stop}$	Tempo de paragem	s
$T1$	Gate IGBT 1	-
$T2$	Gate IGBT 2	-
$T3$	Gate IGBT 3	-
$X_M$	Reatância do motor	$\Omega$
$X_R$	Reatância do banco de bobines	$\Omega$
$X_C$	Reatância do banco de condensadores	$\Omega$
$R_S$	Resistência do estator	$\Omega$
$L_S$	Indutância do estator	H
$R_R$	Resistência do rotor	$\Omega$
$L_R$	Indutância do rotor	H
$L_M$	Indutância de magnetização do motor	H
$R_0$	Perdas nos ferros do motor	$\Omega$
$U_0$	Tensão eficaz do ensaio em vazio	V
$I_0$	Corrente eficaz do ensaio em vazio	A
$P_0$	Potência ativa medida no ensaio em vazio	W
$S_0$	Potência aparente medida no ensaio em vazio	VA
$Q_0$	Potência reativa medida no ensaio em vazio	var
$\phi_0$	Ângulo de defasamento entre a tensão e a corrente no ensaio em vazio	°
$f_0$	Frequência da tensão de alimentação no ensaio em vazio	Hz
$I_m$	Corrente de magnetização	A
$X_0$	Reatância de magnetização	$\Omega$
$U_{cc}$	Tensão eficaz do ensaio com o rotor bloqueado	U
$I_{cc}$	Corrente eficaz do ensaio com o rotor bloqueado	A
$P_{cc}$	Potência ativa medida no ensaio com o rotor bloqueado	W
$S_{cc}$	Potência aparente medida no ensaio com o rotor bloqueado	VA
$Q_{cc}$	Potência reativa medida no ensaio com o rotor bloqueado	var
$\phi_{cc}$	Ângulo de defasamento entre a tensão e a corrente no ensaio com rotor bloqueado	°
$f_{cc}$	Frequência da tensão de alimentação no ensaio com rotor bloqueado	Hz

---

$X_S$	Reatância do estator	$\Omega$
$X_R$	Reatância do rotor	$\Omega$
$P_{Fe}$	Perdas no ferro	-
$\eta$	Rendimento	%
$Q$	Potência Reativa	var

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 IMPORTÂNCIA DO DISPOSITIVO

Atualmente os motores elétricos são máquinas fundamentais na indústria. A sua utilização massificou-se de tal forma que o seu consumo já representa mais de 40% da energia elétrica produzida mundialmente [1]. Estes motores, na União Europeia (EU), representam a carga com o peso mais significativo no que concerne ao consumo de energia elétrica [1].

Da ampla gama de motores elétricos utilizados na indústria, 90% são motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo (MITG) (Figura 1.1), pois de uma perspectiva técnico-económica são os que apresentam, na maioria dos casos, as características mais interessantes comparativamente com os outros [1] [2] [3]. Assim, pode assumir-se que o motor de indução trifásico é o principal responsável pelo enorme consumo de energia na indústria, que por sua vez se reflete numa considerável pegada ecológica.

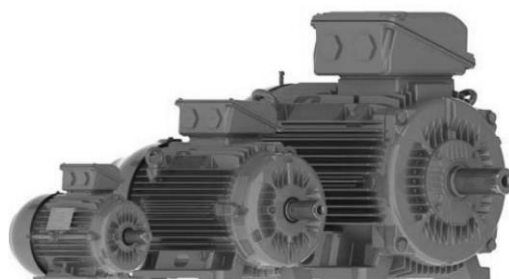


Figura 1.1 – Aspeto típico de um motor trifásico com rotor em gaiola de esquilo [4]

Os motores de indução trifásicos durante o arranque consomem uma corrente muito elevada, ou seja, a qual pode atingir 5-8 vezes a corrente nominal [5], provocando quedas do nível de tensão na rede. Assim, e com o intuito de minimizar problemas adjacentes ao arranque destes motores, foram criadas normas que limitam a corrente de arranque dos mesmos [5]. Atualmente, já existe uma ampla gama de soluções para o arranque de motores de indução trifásicos, contudo a escolha nem sempre é fácil [6].

A poupança de energia elétrica é cada vez mais fundamental e isso reflete-se nos inúmeros estudos da União Europeia com intuito de identificar e recomendar formas de melhorar o desempenho dos motores, diminuindo assim os seus custos do ciclo de vida (Figura 1.2). Tais estudos deram origem a normas de classificação dos motores elétricos por níveis de eficiência [1].

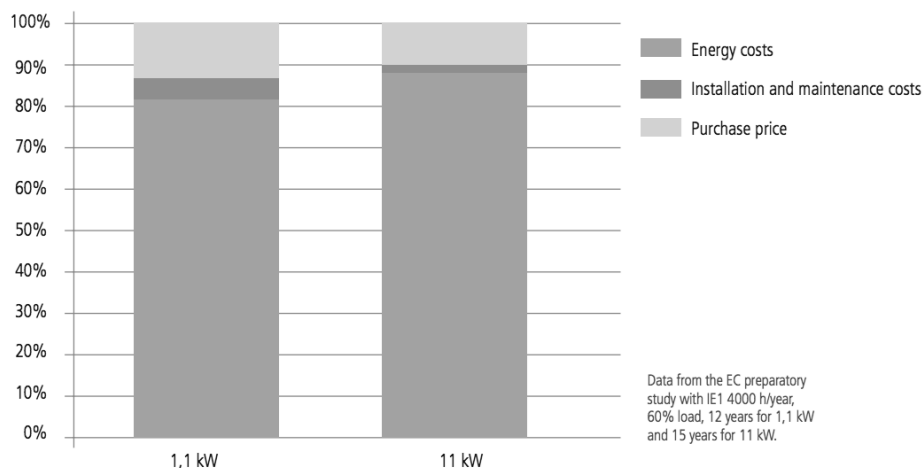


Figura 1.2 – Custos do ciclo de vida dos motores [7]

Devido à falta de soluções técnicas no mercado, existem alguns tipos de aplicações com características específicas (p. ex. carga variável e velocidade constante), com um potencial de poupança ainda por explorar [7] [8] [9].

Na União Europeia, estes motores apresentam um fator de carga médio inferior a 60% (Figura 1.3), como o fator de carga do motor é uma média da carga deste durante um dado período, é possível encontrar motores com carga a variar entre os 75% e menos de 30% da carga nominal [3] [10].

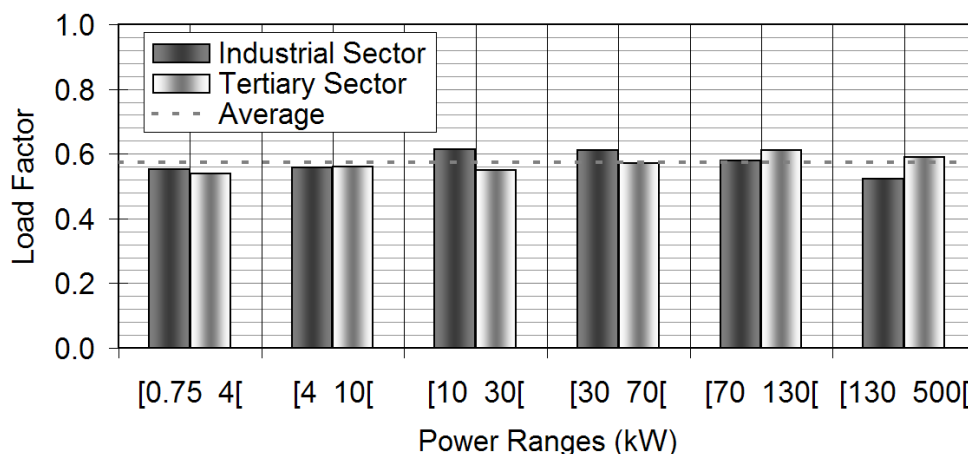


Figura 1.3 – Fator de carga no setor industrial e terciário da EU, por gama de potência [11]

Diretamente relacionado com a carga do motor está o rendimento e o fator de potência do mesmo. Deste modo, à medida que o nível de carga aumenta, também aumenta o rendimento e o fator de potência dos motores de indução trifásicos, conforme se pode observar na Figura 1.4.

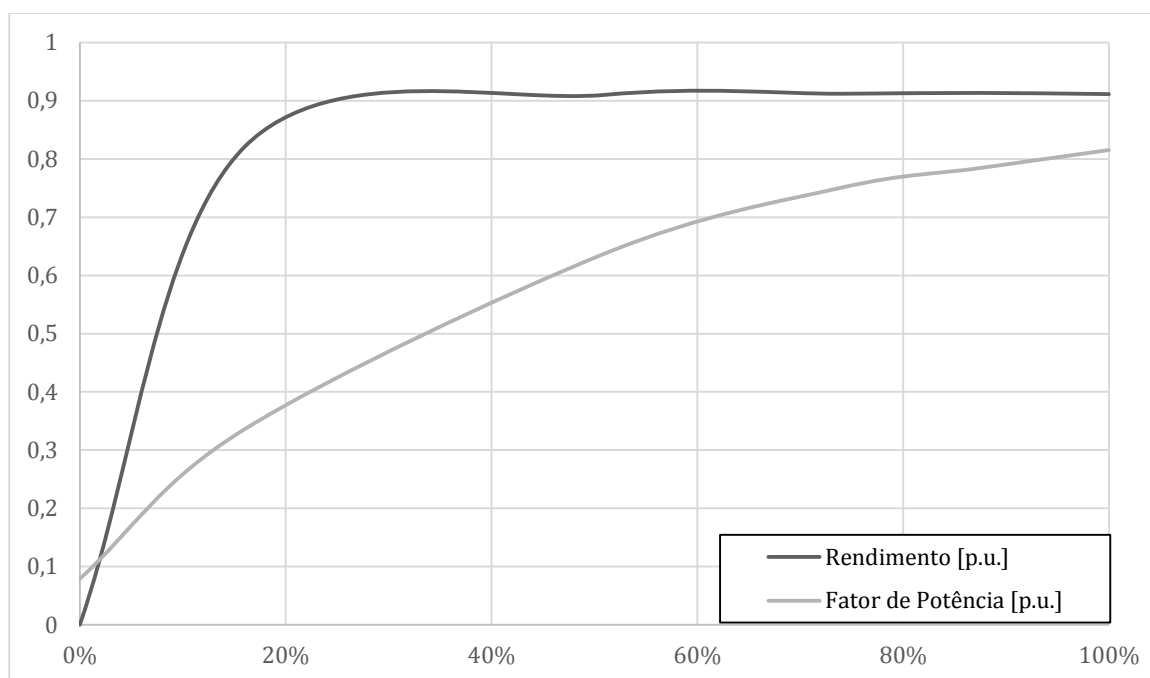


Figura 1.4 – Rendimento e fator de potência obtidos experimentalmente, em função da carga, para um MITG tetrapolar de 7,5 kW, classe IE4

No entanto, para cargas baixas, tanto o rendimento como o fator de potência do motor descem para valores pouco aceitáveis neste tipo de máquinas.

Neste trabalho de projeto apresenta-se um dispositivo inovador que permite poupar energia, melhorar o fator de potência, realizar arranques suaves, comunicar com redes industriais, recolher dados para a criação de um plano de manutenção preventiva, entre outras funcionalidades [3].

## 1.2 TENDÊNCIAS EUROPEIAS

Nos dias de hoje, o tema eficiência energética para um ambiente sustentável apresenta-se como uma tendência a longo prazo que influencia toda a economia assim como as decisões políticas [9].

A pegada ecológica, a política energética e a viabilidade económica estão cada vez mais relacionadas com a capacidade de gerir melhor a energia e usá-la de forma mais eficiente.

Assim, com vista a uma Europa mais eficiente e competitiva, o comité de regulamentação *ecodesign*, composto por representantes dos estados-membros da UE, aprovou o regulamento (CE) No.640 / 2009, onde se definiu requisitos *ecodesign* para motores elétricos.

Foram definidos pelo *International Electrotechnical Commission* (IEC) quatro classes de rendimento para os motores, na norma IEC 60034-30-1 de 2014 (Figura 1.5). Estas classes são:

- IE1 (*Standard Efficiency*);
- IE2 (*High Efficiency*);
- IE3 (*Premium Efficiency*);
- IE4 (*Super Premium Efficiency*).

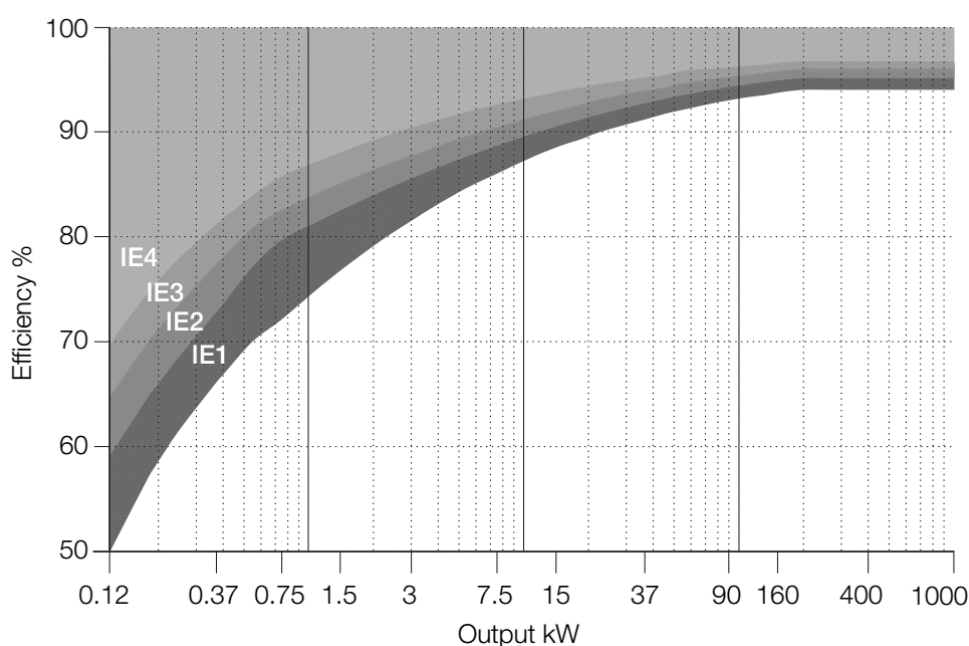


Figura 1.5 – Rendimento nominal de motores tetrapolares de classe de eficiência IE1, IE2, IE3 e IE4, por potência nominal [12]

No regulamento (CE) No.640 / 2009 são impostas três metas para o aumento da eficiência energética dos motores de indução trifásicos no mercado Europeu:

- Desde de 16 de junho de 2011, os motores vendidos têm de ser de classe IE2 ou superior;
- A partir de 1 de Janeiro de 2015, os motores de potência nominal 7,5-375 kW têm de ser de classe igual ou superior IE3 ou, no caso de estarem equipados com variador eletrónico de velocidade (VEV) podem ser de classe IE2;
- A partir de 1 de janeiro de 2017, todos os motores de potência nominal 0,75-375 kW têm de ser de classe igual ou superior IE3 ou, no caso de estarem equipados com variador eletrónico de velocidade (VEV) podem ser de classe IE2 (Figura 1.6).



Figura 1.6 – Timeline imposta pela legislação para a transição da classe de eficiência dos motores elétricos [9]

Como foi dito anteriormente, o principal objetivo da norma (CE) No.640 / 2009 é reduzir o consumo de energia elétrica do motor elétrico tornando o setor industrial mais eficiente e competitivo. O aumento do rendimento do motor de indução trifásico traduz-se numa diminuição do custo do ciclo de vida dos motores.

Por análise da Figura 1.7 percebe-se rapidamente que quanto maior for a potência de um motor maior será a poupança, todavia atente-se que o correto dimensionamento dos motores, evitando sobredimensionamentos, é de extrema importância pois permite maximizar os benefícios ambientais e minimizar o investimento [9] [7].

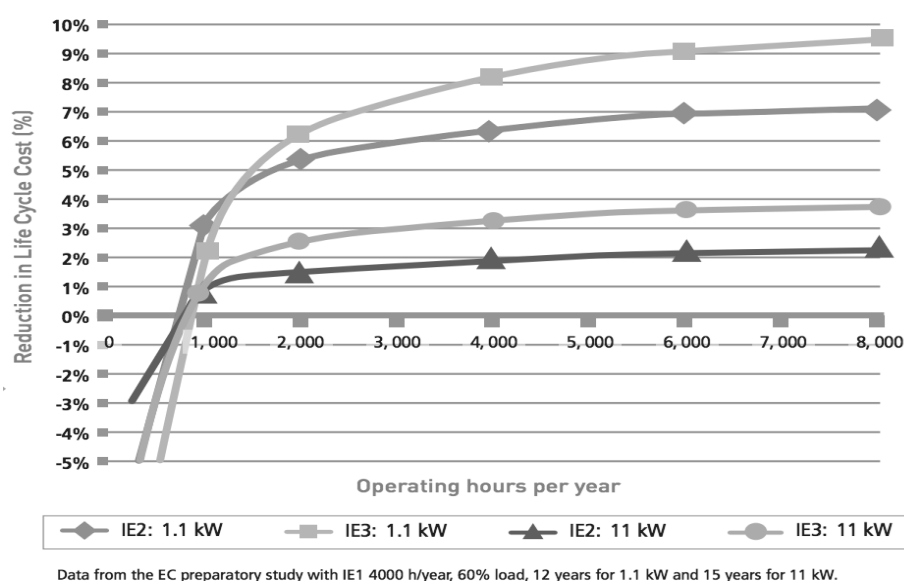


Figura 1.7 – Redução do custo de vida do motor IE2 e IE3 em comparação com motor IE1 [9]

O presente regulamento europeu introduz ainda a possibilidade de utilizar um variador eletrónico de velocidade (VEV) em conjunto com motores IE2, ao invés de um motor de classe de eficiência superior (IE3). Atualmente, os regulamentos relacionados com *ecodesign* continuam a estar voltados para a eficiência energética e não se limitam apenas a olhar para o motor elétrico, contemplando também a introdução de *drivers* que, em conjunto com o motor, permitam soluções de poupança significativas.

### 1.3 ENQUADRAMENTO DO DISPOSITIVO PROPOSTO

As soluções apresentadas no regulamento (CE) No.640 / 2009, assim como as suas metas, podem levar a uma interpretação errada da melhor solução a implementar. A título de exemplo refira-se que, a partir de 16 de junho de 2011 este regulamento impõe que não se produzam motores de classe de eficiência inferior a IE2. Por sua vez, a partir de 1 janeiro de 2015, sugere a instalação de motores de classe de eficiência IE3 ou IE2 com variador eletrónico de velocidade (VEV), para motores de potência compreendida [7,5 – 375] kW. Porém, e do ponto de vista da eficiência energética, um motor IE2 com VEV não é o mesmo que um motor IE3. O estudo preparatório é muito claro neste ponto, a instalação de VEVs em aplicações de carga máxima e velocidade máxima não se traduz num benefício. O estudo ressalva que em situações de velocidade máxima e carga parcial o benefício deve ser verificado. É em cenários de carga e velocidade variável que a instalação de um VEV se afigura mais proveitosa que qualquer melhoria no rendimento do motor [7] [8] [9].

Os benefícios da utilização de um variador eletrónico de velocidade a um motor IE2 têm de ser claros, caso contrário é preferível optar por um motor IE3. Existem inúmeros casos onde este tipo de situações se verifica, como sejam todas as aplicações onde a velocidade é constante e a carga varia ao longo do ciclo de trabalho do motor (tapetes rolantes, misturadoras, outras).

A informação apresentada na Tabela 1.1 e na Figura 1.8 corroboram tudo aquilo que tem vindo a ser dito, isto é, comprova que existe um aumento de consumo, que por sua vez levará a um *payback* muito mais longo.

De ressaltar que, na Tabela 1.1, as perdas associadas ao equipamento de controlo quando o motor está diretamente alimentado da rede (5,3 W) são resultantes do uso de contactores para controlo do motor.



Tabela 1.1 – Comparação de eficiência de uma aplicação industrial de velocidade constante com e sem variador eletrónico de velocidade. [7]

Potência Mecânica		1,1 kW				11 kW			
Classe de rendimento do motor		IE2		IE3		IE2		IE3	
Rendimento nominal do motor	%	81,4		84,1		89,8		91,4	
Potência consumida pelo motor à plena carga	kW	1,35		1,31		12,25		12,04	
		Direto	VEV	Direto	VEV	Direto	VEV	Direto	VEV
Perdas do equipamento de controlo	W	5,3	138	5,3	138	10,7	426	10,7	426
Consumo total do sistema	kW	1,36	1,49	1,31	1,45	12,26	12,68	12,05	12,46
Rendimento total	%	81,1	73,9	83,8	76,1	89,7	86,8	91,3	88,3

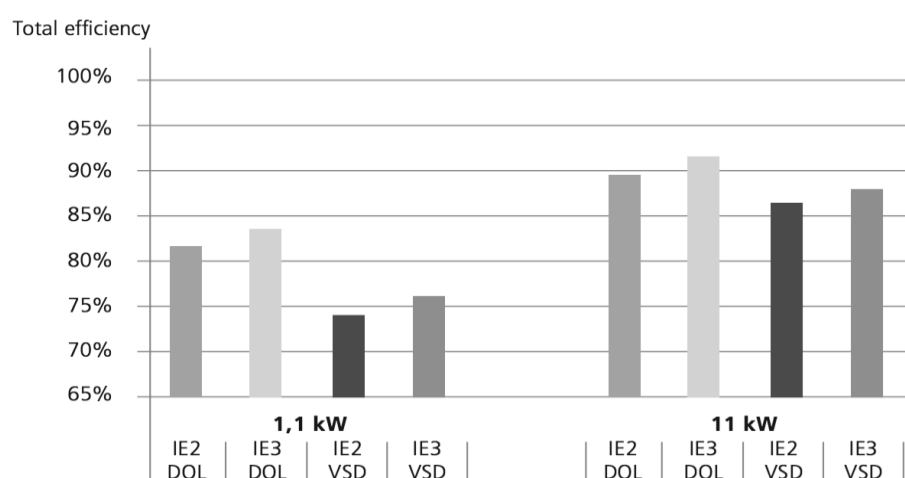


Figura 1.8 – Comparação de eficiência de uma aplicação de velocidade constante, diretamente alimentada da rede, com variador eletrónico de velocidade [7]

Considere-se agora um caso concreto de um tapete rolante que opera com um motor de 37 kW, numa aplicação industrial representada na Figura 1.9. A velocidade, desta aplicação é em muito casos constante, contudo, o binário exigido ao motor depende da quantidade de material que está a ser transportado pela mesma.



Figura 1.9 – Exemplo de uma aplicação com velocidade fixa [9]

Esta aplicação é do tipo “velocidade fixa e carga variável”. O seu diagrama de carga apresenta níveis de carga a variar entre 20% e 80% da carga máxima, conforme se pode observar na Figura 1.10.

Assumindo-se que a passadeira trabalha 3600 horas por ano e a cada nível de carga está associado um valor de eficiência diferente. O exemplo compara a utilização do motor diretamente alimentado da rede ou usando VEV. No caso em que o motor está sem carga, o contactor é desatrancado e no caso do VEV este permanece em *standby* (Tabela 1.2).

Pelos dados apresentados na Tabela 1.2 deduz-se que o VEV não está a fazer regulação do fluxo do motor, facto que poderia melhorar o rendimento final do conjunto VEV + motor.

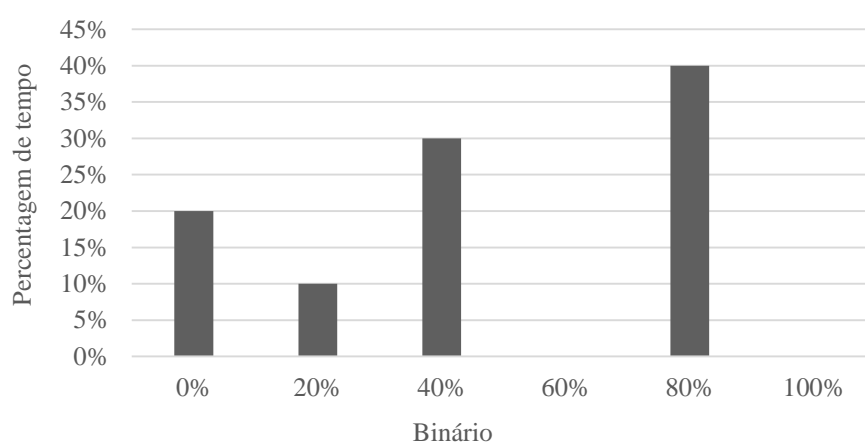


Figura 1.10 – Perfil de carga da aplicação do exemplo apresentada anteriormente [9]

Tabela 1.2 – Consumo de energia anual de uma correia transportadora de 37 kW com o perfil de carga apresentado na Figura 1.10. [9]

Carga	Eficiência		Energia consumida por ano [MWh]	
	Contactora + Motor	VEV+Motor	Contactora + Motor	VEV+Motor
10%	Desligado	Standby	0,0	1,6
20%	90%	83%	3,0	3,2
40%	92%	87%	17,4	18,4
60%	93%	91%	-	-
80%	94%	91%	45,3	46,8
100%	93%	90%	-	-
Total			65,7	70,0

Com este exemplo é perceptível que é preferível usar um motor de classe de eficiência superior, diretamente alimentado da rede, pois nesse caso as poupanças seriam 6,1%. Mesmo que não tivéssemos momentos sem carga, continuaria a ser preferível ligar o motor diretamente à rede e nesse caso as poupanças seriam de 5,5%.

Com intuito de fazer arranques suaves (estrela-triângulo) e de melhorar o rendimento dos MITG, apresenta-se no Capítulo 3 um dispositivo eletrónico que pode ser usado nos exemplos anteriormente referidos assim como em todas as aplicações do tipo “velocidade constante e carga variável” como por exemplo uma grua (Figura 1.11).

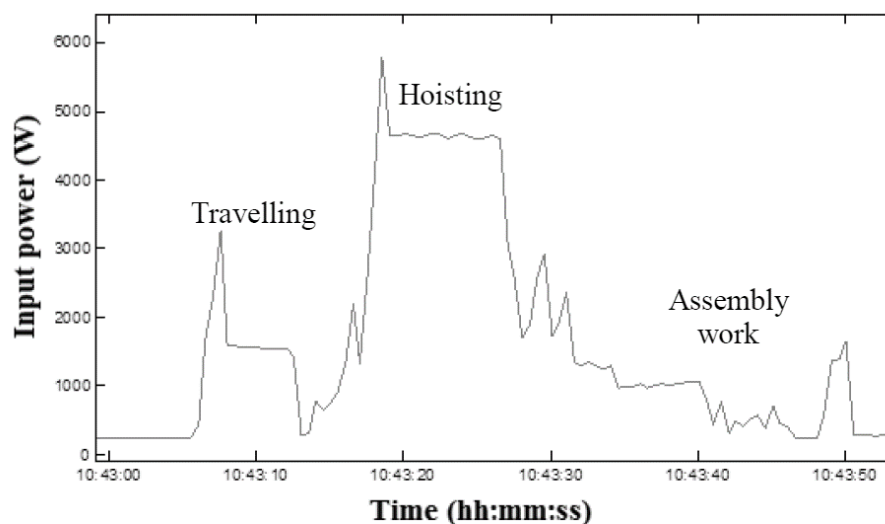


Figura 1.11 – Diagrama de carga típico de uma grua [13]

#### 1.4 MOTIVAÇÕES

A Eletrotecnia é uma área da engenharia que visa, não só mas também, a melhoria dos processos utilizados na indústria. Uma das melhorias é o aumento da eficiência energética das máquinas utilizadas nos processos de fabrico.

Com o intuito de melhorar o rendimento e o fator de potência dos MITG, os mais utilizados na indústria, este trabalho de projeto apresenta um dispositivo que permite melhorar o seu desempenho.

A clara necessidade de melhorar a eficiência energética e de reduzir as emissões de dióxido de carbono estão na ordem do dia e prova disso são os inúmeros programas internacionais em curso para promover essas alterações. Com a tecnologia proposta apresenta-se uma nova e inovadora solução que pode contribuir para o melhoramento do rendimento e do fator de potência dos MITG.

Este trabalho de projeto é desenvolvida no âmbito do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Automação e Comunicação em Sistemas de Energia e pretende com os conhecimentos adquiridos ao longo do percurso académico apresentar e quantificar os benefícios adjacentes à utilização do dispositivo proposto com vista a entrada do mesmo no mercado. Como o intuito

de no futuro comercializar esta tecnologia interessa ainda mesurar o mercado potencial associado à tecnologia proposta.

## 1.5 OBJETIVOS

Neste trabalho de projeto apresenta-se uma análise técnico-económica de um dispositivo eletrónico para alteração automática do tipo de ligação dos enrolamentos estatóricos dos MITG, em função do seu nível de carga. Nesta evidenciam-se as vantagens de utilizar a tecnologia proposta em motores que com arranque estrela-triângulo (Y-D) sem variação do seu nível carga, assim como em motores com velocidade constante e variação do seu nível de carga em regime permanente.

Com a elaboração do presente trabalho de projeto pretende-se então estudar as tecnologias comercialmente disponíveis para fazer o arranque suave dos MITG. Pretende-se também explicar de forma breve o funcionamento do dispositivo bem como o *hardware* que este integra.

A tecnologia proposta permite reduzir o consumo de energia elétrica nos motores de indução. Uma vez que existem várias classes de eficiência para caracterizar o rendimento destes motores e apresenta-se neste trabalho de projeto a quantificação do aumento do rendimento e do fator de potência para diferentes classes de rendimento.

Com o intuito de introduzir o dispositivo proposto no mercado, interessa então perceber qual o mercado potencial adjacente bem como saber a opinião de alguns dos potenciais utilizadores finais do dispositivo, sendo apresentadas neste trabalho de projeto algumas considerações sobre estes pontos.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO DE PROJETO

Com intuito de apresentar uma análise técnico-económica do dispositivo, no Capítulo 2 é feita uma breve introdução aos MITG, olhando para as características que o levam a ser o motor mais utilizado mundialmente. São apresentadas duas soluções comuns para o controlo de circuitos de potência através de um circuito de comando (comuns nos acionamentos que integram MITG). É ainda abordada a necessidade de fazer arranques suaves nos motores acima referidos, assim como os tipos de arranques possíveis para MITG.

No Capítulo 3 apresenta-se o conceito do dispositivo proposto, assim como o princípio de funcionamento adjacente e a eletrónica utilizada para colocar este último em prática.

No Capítulo 4 expõem-se algumas simulações teóricas que corroboram o princípio de funcionamento apresentado no capítulo anterior.

No Capítulo 5 estuda-se o impacto no desempenho dos MITGs, do princípio de funcionamento do dispositivo proposto para motores de potências e classes de eficiência diferentes. São estimadas as poupanças monetárias, associadas à instalação da tecnologia proposta. Apresentam-se ainda duas abordagens relativamente a estas poupanças, uma na perspetiva de maximizar o rendimento e outra na perspetiva de minimizar o consumo da energia reativa (maximização do fator de potência), assim como uma análise de *payback* para a tecnologia proposta tendo em por base as poupanças monetárias estimadas.

No Capítulo 6 definem-se as tecnologias comerciais concorrentes do dispositivo proposto e afere-se a sua penetração no mercado. Apresenta-se ainda uma comparação entre as diferentes características das tecnologias apresentadas e através destas extrapola-se o mercado potencial do dispositivo.

No Capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões do trabalho apresentado e propõem-se trabalhos futuros.



## Capítulo 2

### ESTADO DA ARTE

#### 2.1 MOTORES ELÉTRICOS

O motor elétrico é uma máquina muito utilizada não só na indústria como no setor terciário. Esta máquina tem como principal função transformar energia elétrica em energia mecânica. Comparativamente com outras máquinas com o mesmo propósito, mas que utilizam outra fonte de energia primária que não a eletricidade, por exemplo o petróleo (motores de combustão interna), os motores elétricos são significativamente mais eficientes.

A população mundial de motores elétricos instalados estima-se em cerca de 2,23 biliões de unidades [14]. Na UE-15 a sua população é também muito numerosa e, à semelhança do resto do mundo, espera-se que aumente ainda mais ao longo dos próximos anos (Figura 2.1).

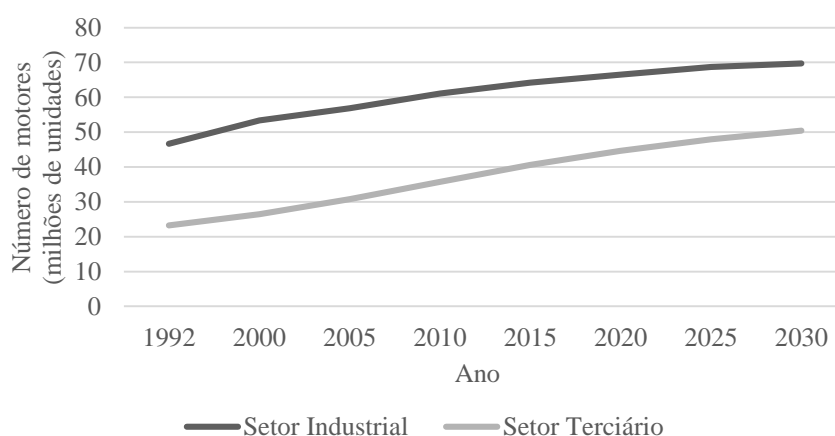


Figura 2.1 – Evolução estimada do numero de motores de indução trifásicos instalados no setor industrial e terciário da EU-15, com base nos anos anteriores [11]

Os motores elétricos podem ter diferentes tipos de alimentação (alimentação em corrente contínua ou corrente alternada) podendo a sua classificação ser motores DC ou motores AC. Completada esta primeira divisão sucedem-se outras que se prendem com algumas especificações tecnológicas (Figura 2.2).

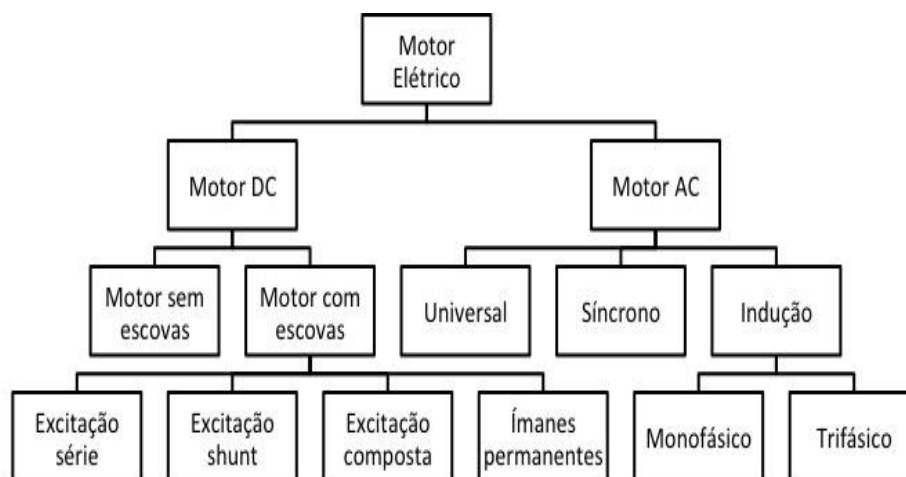


Figura 2.2 – Caraterização dos motores elétricos [11]

Para efeitos de estudo no presente trabalho de projeto só se irá abordar o motor de indução trifásico com rotor em gaiola de esquilo (*Three-Phase Asynchronous Motor*) isto porque, como já foi referido anteriormente, é atualmente o mais utilizado na indústria (Figura 2.3) [6].

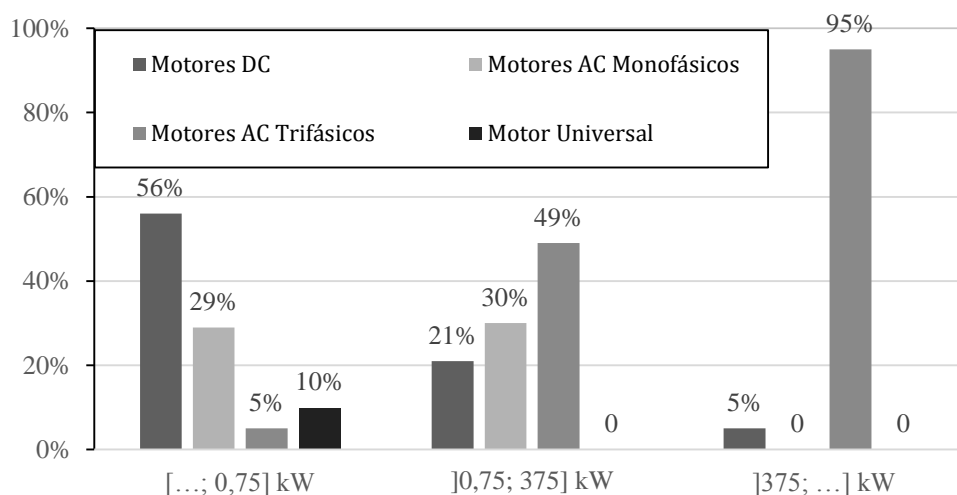


Figura 2.3 – Percentagem de venda de motores e geradores elétricos na UE-27 em 2012 [14]

### 2.1.1 Motor de indução trifásico

O princípio de funcionamento do motor de indução polifásico foi apresentado em 1885 por Galileo Ferraris, tendo Nikola Tesla chegado, de forma independente, aos mesmos resultados em 1886. Esta descoberta permitiu criar o MITG (Figura 2.4), como já foi dito anteriormente, irá ser analisado.



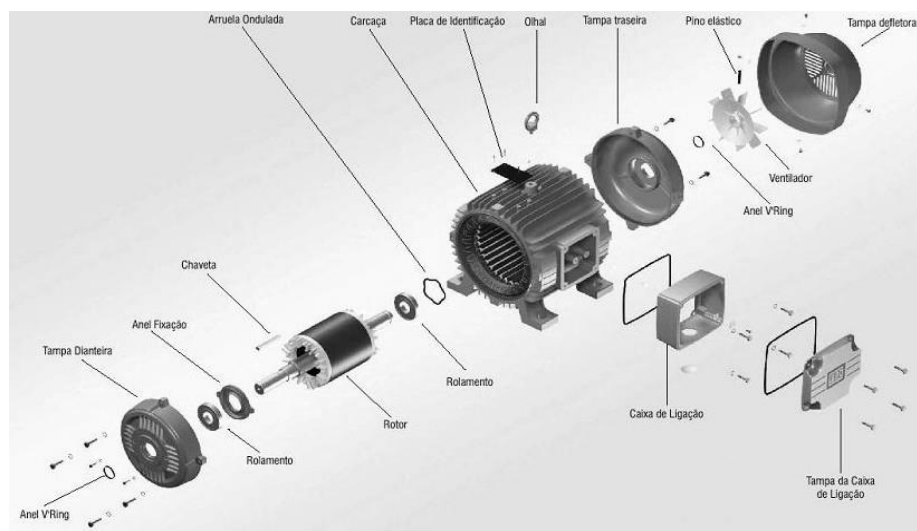


Figura 2.4 – Partes constituintes do MITG [15].

O MITG (Figura 2.5) é constituído por duas partes principais, o estator - parte fixa - e o rotor - parte móvel. Estas duas partes encontram-se separadas por um espaço de ar muito pequeno denominado entreferro [16] [17].

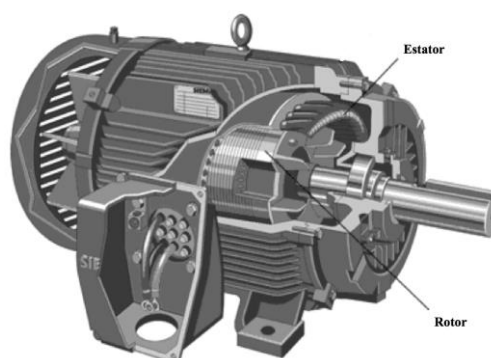


Figura 2.5 – Motor de indução trifásico com rotor em gaiola de esquilo [11].

O núcleo ferromagnético estatórico é formado por um conjunto de chapas ferromagnéticas com ranhuras empilhadas e isoladas entre si (Figura 2.6). Nestas ranhuras estão alojados três conjuntos de enrolamentos desfasados entre si de  $120^\circ$  elétricos, por onde passará a corrente elétrica que origina o campo magnético girante. Por sua vez, o estator fica contido na carcaça do motor, construída em ferro ou alumínio fundido [16]

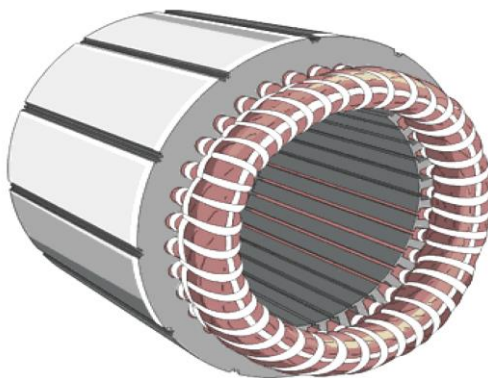


Figura 2.6 – Estator do motor AC [11]

O rotor é constituído por um conjunto de barras de alumínio ou cobre, fechadas nos topos por dois anéis do mesmo material que as barras (Figura 2.7) [18] [19].

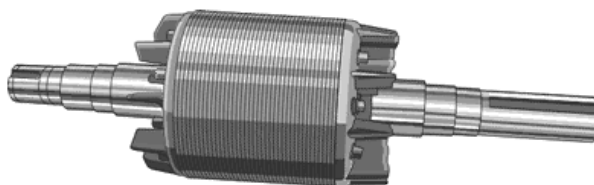


Figura 2.7 – Rotor em gaiola de esquilo [11]

Atendendo ao tipo de construção descrito anteriormente, quando se alimenta o circuito estatórico com uma corrente alternada, este dá origem a um campo magnético girante ou rotativo. Este campo induz correntes no rotor. Da interação entre o campo magnético girante e as correntes induzidas no rotor do motor resulta a produção de um binário, fazendo com que o motor rode nesse sentido (Figura 2.8) [18] [19]. A velocidade de rotação do rotor é imposta tanto pela velocidade de rotação do campo magnético (velocidade síncrona,  $n_s$ ) que por sua vez depende diretamente da frequência da tensão de alimentação e inversamente do número de polos do motor [6]. A velocidade de sincronismo, em rpm, é dada pela equação (2.1).

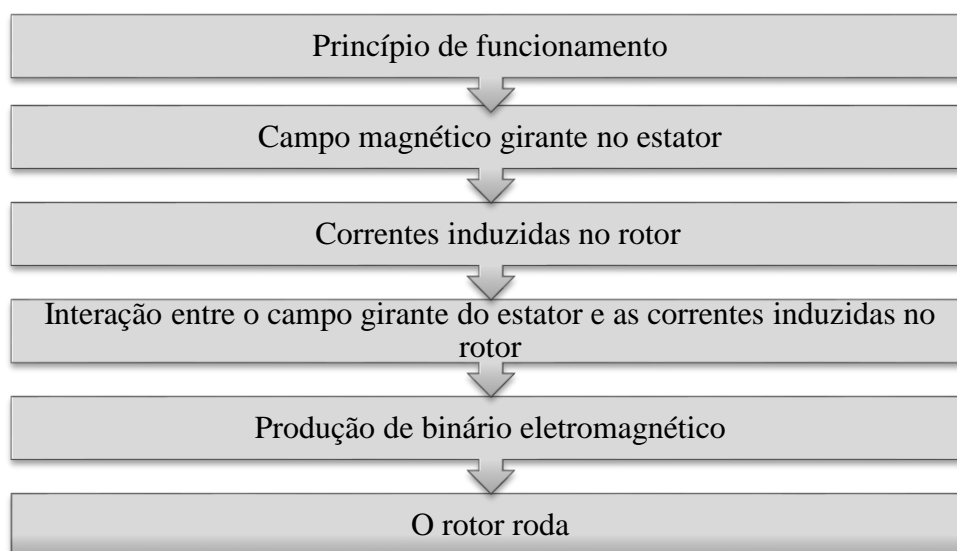


Figura 2.8 – Resumo do princípio de funcionamento de um MITG [17]

Desta forma, se um motor for alimentado por uma tensão com uma frequência de 50Hz ( $f=50\text{Hz}$ ) e possuir dois pares de pólos ( $p=2$ ), a sua velocidade de sincronismo ( $n_s$ ) é 1500 rpm, porém o rotor não gira a esta velocidade devido ao deslizamento (diferença entre a velocidade rotacional do rotor e do campo girante), daí o nome de motor trifásico assíncrono.

$$n_s = 60 \frac{f}{p} \quad (2.1)$$

Pela equação (2.2) é possível calcular o deslizamento do motor sabendo a velocidade de sincronismo e a velocidade a que está a rodar o motor ( $n$ ). O deslizamento aumenta de forma aproximadamente linear com a carga, sendo quase zero na ausência de carga.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.2)$$

Na Figura 2.9 pode-se constatar que o motor não pode operar na velocidade de sincronismo dado que o binário desenvolvido nessa velocidade é zero. Assim, a velocidade do motor vai depender também do binário da carga, isto é, o ponto de funcionamento do motor é obtido pela interceção da curva de binário do motor com a curva de binário da carga. Deste ponto de funcionamento obtém-se o binário e a velocidade do motor para uma dada carga.

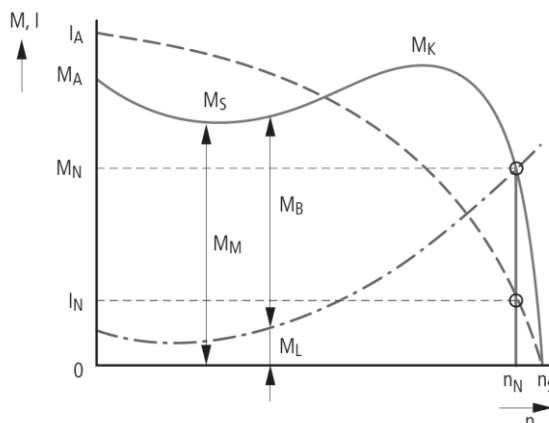


Figura 2.9 – Curvas características de um motor trifásico assíncrono ( $I_A$  – Corrente de arranque;  $I_N$  – Corrente nominal;  $M_A$  – Binário de arranque;  $M_B$  – Binário de aceleração;  $M_K$  – Binário máximo;  $M_L$  – Binário da carga;  $M_N$  – Binário do motor;  $n$  – Velocidade;  $n_N$  – Velocidade nominal;  $n_S$  – Velocidade de sincronismo) [6].

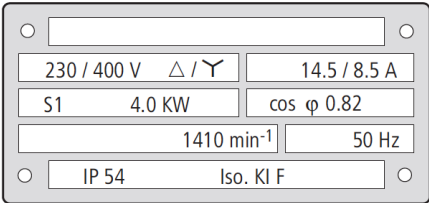
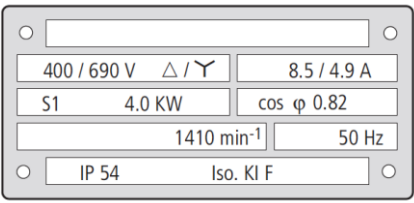
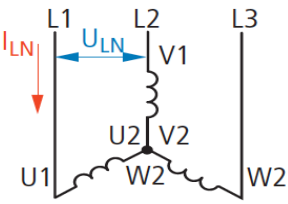
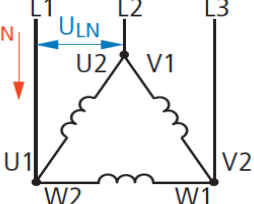
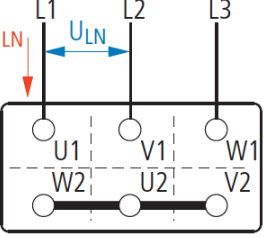
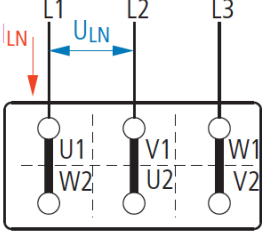
### 2.1.2 Características principais

O motor de indução trifásico é o motor elétrico mais utilizado no mundo, devido às suas vantajosas características, nomeadamente:

- Construção simples;
- Rendimento relativamente elevado;
- Manutenção reduzida;
- Binário de arranque elevado;
- Acionado diretamente da rede ou por meio de controladores;
- Possibilidade de controlo de velocidade;
- Melhor relação qualidade/preço e/ou potência (kW)/preço [6] [11].

Para ligar um motor trifásico à corrente elétrica é necessário que os dados da placa de identificação correspondam à tensão nominal e à frequência da rede. A ligação é feita por intermédio de seis terminais parafusos (versão *standard*) na caixa de terminais do motor. Por norma a placa de identificação referencia dois tipos de circuitos, ligação em estrela e ligação em triângulo (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Circuitos de conexão do motor [6]

Ligação em Estrela	Ligação em Triângulo
	
	
$U_{LN} = \sqrt{3} \cdot U_w$	$U_{LN} = U_w$
$I_{LN} = I_w$	$I_{LN} = \sqrt{3} \cdot I_w$
	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Este motor pode ser alimentado com 400 V em Y ou com 230 V em D.</li> <li>• Por a rede de baixa tensão trifásica oferecer 400 V no mínimo este motor só pode ser ligado em Y.</li> <li>• Na ligação Y as três fases (W2-U2-V2) são configuradas na caixa de terminais no chamado ponto de estrela.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Este motor pode ser alimentado com 690 V em Y ou com 400 V em D.</li> <li>• Neste caso motor pode ser ligado diretamente à rede em Y ou D.</li> <li>• Para ligar o motor em D, as extremidades dos enrolamentos são ligado na caixa de terminais (U1-W2, V1-U2, W1-V2).</li> </ul>

### 2.1.3 Características dos motores

Os motores são descritos por diversos parâmetros, de entre eles refira-se:

- Tensão nominal;
- Frequência;
- Binário de arranque máximo e nominal;
- Corrente de arranque;

- Corrente nominal em regime permanente;
- Fator de potência nominal;
- Classe de isolamento;
- Tamanho da carcaça;
- Tipo de enrolamento;
- Classe de eficiência;
- Potência de nominal (potência útil/frequência nominal);
- Velocidade nominal;
- Rendimento em função da carga, outros.

Não é objetivo deste trabalho de projeto estudar todos estes parâmetros, porém far-se-á uma breve explicação de alguns deles.

A potência do motor é sem dúvida um dos pontos mais importantes, tendo em conta que o seu valor condiciona a seleção do equipamento a utilizar. Para o cálculo da potência mecânica desenvolvida pelo motor no veio (equação 2.3), é necessário saber o seu ponto de funcionamento, p.ex. a velocidade,  $\omega$  (rad/s), e o binário,  $T$  (N.m).

$$P_{mec} = T \cdot \omega \quad (2.3)$$

Importa ainda salientar que existem quatro pontos de binário a ter em conta no motor. O binário do ponto de funcionamento, binário nominal, o binário máximo e o binário de arranque. Este último é bastante importante pois permite saber com que carga o motor pode arrancar. No momento do arranque deve-se prestar bastante atenção, pois MITG têm como característica uma corrente de arranque muito elevada, sendo por vezes necessário minimizá-la. Esta ação pode contudo conduzir simultaneamente a um decréscimo do binário de arranque como se verá mais à frente.

O rendimento do motor em regime permanente é outro aspeto importante a ter em consideração tendo em conta que durante o seu ciclo de vida o consumo de energia é o custo mais preponderante neste tipo de motores [7]. Assim o rendimento,  $\eta$ , do motor é dado pelas equações (2.4), (2.5) e (2.6).

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{ele}} = \frac{T \cdot \omega}{\sqrt{3} V_L I_L \cos \Phi} \quad (2.4)$$

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{mec} + Perdas} = \frac{1}{1 + \frac{Perdas}{P_{mec}}} \quad (2.5)$$

$$\eta = \frac{P_{ele} - Perdas}{P_{ele}} = 1 - \frac{Perdas}{P_{ele}} \quad (2.6)$$

A diferença entre a potência elétrica de entrada e a potência mecânica de saída fica a dever-se aos diversos tipos de perdas (Figura 2.10), nomeadamente:

- Elétricas;
- Magnéticas;
- Mecânicas;
- Suplementares.

As perdas elétricas ( $I^2R$ ), também denominadas perdas por efeito de Joule, aumentam com a carga do motor e aparecem sob a forma de calor. Este calor é gerado na resistência elétrica dos enrolamentos do estator assim como das barras e anéis do rotor devido à corrente que neles circula.

As perdas magnéticas devem-se ao fenómeno de histerese e à circulação de correntes de Foucault, e aumentam aproximadamente com o quadrado da densidade do fluxo.

As perdas mecânicas resultam da fricção dos rolamentos e da ventilação.

Por fim, as perdas suplementares ou extraviadas têm origem em fenómenos de fuga de fluxo, distorção harmónica do fluxo, correntes não uniformes, imperfeições mecânicas, irregularidades do entreferro, entre outras.

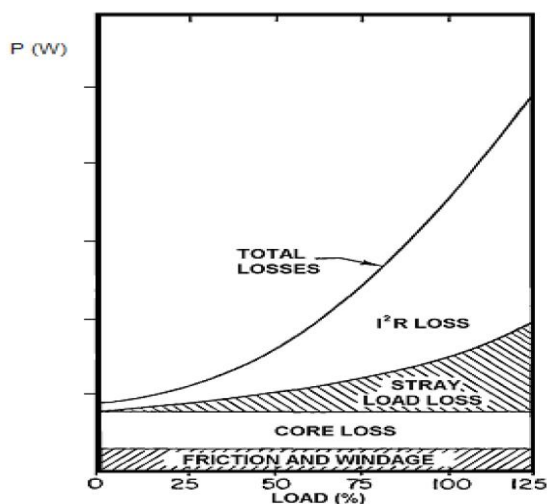


Figura 2.10 – Distribuição típica das perdas no motor de indução, em função da carga [11]

Estas perdas determinam o rendimento final do motor. Para aferir este rendimento existem diferentes testes-padrão em todo o mundo, ou seja, normas que definem os diferentes métodos para avaliar as perdas de cada máquina e assim se proceder a uma classificação em função do seu rendimento.

## 2.2 CONTACTORES vs. SSRs

Os MITG encontram-se muitas vezes instalados em aplicações como:

- Extrusoras;
- Ventiladores;
- Tapetes rolantes;
- Misturadoras;
- Outras...

Para fazer o arranque, paragem e/ou até mesmo inversão do sentido de rotação destes motores é comum utilizar-se contactores mecânicos (Figura 2.11).





Figura 2.11 – Aspeto típico de um contactor [20]

Este dispositivo é constituído por um bloco com três contactos bipolares principais que quando se fecham possibilitam a alimentação do motor. Pode então dizer-se que o contactor é um dispositivo que permite manobrar cargas elétricas de elevada potência de forma segura e eficiente, sendo acionado por um circuito de comando baixa potência.

Assim, quando se alimenta a bobine de um contactor, surge uma força eletromagnética que “puxa” os contactos móveis para que estes se conectem aos contactos fixos, ficando os terminais de entrada em contacto com os da saída.

Os contactores eletromecânicos possuem no entanto algumas desvantagens, as mais comuns aparecem quando se estão a manobrar cargas elétricas de alguma potência, nomeadamente arcos elétricos que danificam os contactos principais e que surgem quando se liga ou desliga estas cargas [21]. Os danos causados neste tipo de dispositivo podem ter consequências muito graves, por exemplo, um MITG por um contactor com um contacto danificado passa a ser alimentado por somente duas das três fases. O motor continua a girar porém, se operar neste regime durante algum tempo e com alguma carga, acaba por queimar os seus enrolamentos. Esta situação é de todo indesejável, até porque na indústria transformadora os motores são o coração das empresas, para além disso este tipo de reparação não é muito barata e por norma é feita por pessoal especializado. Os contactores possuem outras desvantagens como seja o facto de necessitarem de manutenção das partes mecânicas, de serem lentos a ligar/desligar comparativamente com os sistemas eletrónicos, entre outras...

Como resposta a estes problemas em 1970 foram desenvolvidos os *Solid State Relays* (SSRs) ou relés de estado sólido (Figura 2.12) [22].



Figura 2.12 – Aspeto típico dos SSRs [23]

Este dispositivo não possui partes mecânicas/móveis e permite executar as funções do contactor eletromecânico sem os problemas que lhe estão associados.

Os SSRs ao invés dos contactores eletromecânicos utilizam eletrónica de potência (*triacs* ou *tirístores*) para manobrar as cargas elétricas. Os *triacs* e *tirístores* são uma alternativa de baixo custo para eliminar, por exemplo, os arcos elétricos, oferecendo ainda comutações rápidas, um tempo de vida longo, ausência de ruído acústico, entre outras [22].

No caso dos motores (carga altamente indutiva), os SSRs, devido ao facto de fazerem as comutações por meio de *triacs* ou *tirístores* com *zero-crossing*, permitem minimizar fenómenos transitórios. O *zero-crossing* só permite que o *triac* ou *tiristor* entre em condução quando a tensão passa por zero, o que se traduz num  $dv/dt$  muito baixo que por sua vez conduz a um  $di/dt$  também ele inferior. No caso do deslastre, estes dispositivos eletrónicos só deixam de estar em condução quando a corrente é zero, o que mais uma vez se traduz numa vantagem [24].

Os SSRs, assim como os contactores eletromecânicos, permitem controlar, de forma segura e eficiente, circuitos de alta potência por meio de circuitos de baixa potência (Figura 2.13).

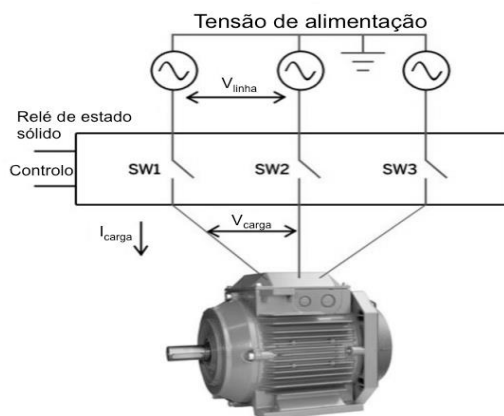


Figura 2.13 – Diagrama de controlo de cargas trifásicas com SSRs [22]

## 2.3 LEGISLAÇÃO

Como visto anteriormente, os MITG, devido à sua simplicidade de construção, elevada robustez, elevado rendimento e relativo baixo custo, são a escolha preferida da indústria. Contudo, estes motores apresentam como característica uma corrente de arranque muito elevada. Esta corrente surge da necessidade de uma grande quantidade de energia para magnetizar o circuito magnético que, por sua vez, tem de vencer a inércia do sistema [25].

A corrente de arranque de um MITG é tipicamente 6 a 7 vezes superior à sua corrente nominal, todavia existem casos em que esta pode ser 9 a 10 vezes a nominal [2].

Por sua vez, correntes de arranque tão elevadas dão origem a quedas de tensão anormais na rede que irão produzir diminuição da tensão noutros recetores, aquecimento excessivo dos condutores da rede e eventual atuação das proteções [6].

Por este motivo, a legislação dos diferentes países impõe condicionamentos ao arranque direto dos MITGs, sobretudo na ligação de motores alimentados diretamente por redes de distribuição pública de baixa tensão.

No caso da legislação portuguesa, nomeadamente as RTIEBT (Regras Técnicas de Instalações Elétricas de Baixa Tensão), impõem limites de corrente máxima que podem ser atingidos no arranque de motores. Segundo a Secção 553 da RTIEBT, há um conjunto de fatores a ter em conta para a preservação e o bom funcionamento das instalações elétricas.

A corrente absorvida por um motor durante o seu arranque (ou por um conjunto de motores que possam arrancar simultaneamente) deve ser limitada a um valor. Este valor não deve ser prejudicial à conservação da instalação que o alimenta, nem originar perturbações inaceitáveis ao funcionamento dos outros equipamentos ligados à mesma fonte de energia [26].

No caso de motores alimentados diretamente por uma rede de distribuição, os seus arranques não originam, em regra, perturbações excessivas se a intensidade de arranque não ultrapassar os valores indicados pela Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Corrente de arranque máxima de motores alimentados diretamente da rede de distribuição (pública) [26]

Ligação do Motor	Utilização dos Locais	Intensidade Máxima de Arranque (A)	
		Rede Aérea	Rede Subterrânea
Monofásico	Habitação	45	45
	Outros Usos	100	200
Trifásico	Habitação	60	60
	Outros Usos	125	250

Para valores de intensidade de arranque superiores aos indicados no Tabela 2.2, a alimentação direta dos motores, a partir da rede de distribuição (pública), carece de um parecer favorável do distribuidor de energia, para que sejam tomadas as medidas apropriadas para tornar a sua utilização compatível com a exploração da instalação e a não criar assim perturbações graves aos restantes utilizadores [26].

Para a conservação da instalação é conveniente que não se produzam aquecimentos exagerados nas canalizações nem se verifique a atuação dos dispositivos de proteção durante o arranque [26].

As perturbações no funcionamento dos outros equipamentos, ligados à mesma fonte de energia, são devidas à queda de tensão provocada pelo pico de corrente, durante o arranque, que podem atingir valores largamente superiores aos da corrente absorvida pelo motor à plena carga [26].

Na Tabela 2.3 são indicadas as potências máximas dos motores mais comuns que, em regra, satisfazem as correntes de arranque indicadas no Tabela 2.2. Nos “outros usos”, indicados no Tabela 2.2 incluem-se os destinados ao setor terciário, à indústria, aos serviços comuns dos edifícios de habitação, aos locais agrícolas e pecuários, entre outros [26]. De realçar que apesar de a lei não o obrigar, é comum os MITGs com potência igual ou superior a 4 kW estarem equipados com arrancadores Y-D ou com *soft-starter*.

Na ligação direta de motores, a uma rede de distribuição (pública) deve ter-se particular cuidado nos casos que:

- a) Acionem máquinas de grande inércia;
- b) Sejam de arranque lento em carga;
- c) Tenham arranques frequentes;
- d) Sejam de travagem ou de inversão de marcha por contra corrente [26].

Tabela 2.3 – Potência máxima (kW) estipulada dos motores alimentados diretamente por uma rede de distribuição (pública) [26]

Tipo de Local	Tipo de Rede	Motores Monofásicos 230 V	Motores Trifásicos 400 V	
			Arranque Direto à Plena Carga	Outros Modos de Arranque
Habitação	Qualquer	1,4	5,5	11
Outros Locais	Aérea	3	11	22
	Subterrânea	5,5	22	45

Não obstante os valores referidos anteriormente, dependendo das características dos motores e da potência absorvida no arranque, exige-se então que o arranque se faça por intermédio de

arrancadores apropriados, destinados a limitar a corrente de arranque sempre que esta possa ser causa das perturbações indicadas [26].

## 2.4 TIPOS DE ARRANQUES DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS COM ROTOR EM GAIOLA DE ESQUILO

Desde a invenção do MITG (1889) e com a rápida evolução da tecnologia têm vindo a ser criadas várias soluções para o seu arranque, com vista a mitigar os respetivos efeitos secundários [6].

De entre os vários métodos disponíveis no mercado para o arranque do motor de indução trifásico destacam-se o arranque direto, o arranque estrela-triângulo, o arranque com arrancador suave eletrónico (*Soft-Starter*) e o arranque com variador eletrónico de velocidade [5]. No entanto, nalguns casos, podem ainda ser apresentados outros, tais como o arranque com autotransformador, o arranque com bobine em série com o motor, o arranque com banco de condensadores e o arranque com enrolamentos parciais. Como se irá verificar mais adiante a escolha do método de arranque depende do motor, da carga e do tipo de rede elétrica a que a instalação está ligada. Sendo, contudo, ainda necessário ter em conta, no momento da escolha do tipo de arrancador e proteções, outros fatores, como a queda de tensão na instalação quando se arranca o motor, o binário da carga no arranque e o tempo de arranque [25].

As especificações da arquitetura do sistema de arranque devem resultar dos diferentes requisitos da aplicação, incluindo a eficiência energética, a fiabilidade e o custo ao longo do ciclo de vida [9].

### 2.4.1 Arranque direto

Este tipo de arranque é o mais comum, dos disponíveis no mercado, para aplicações de sistema de eixos mecanicamente rígidos e bem dimensionados. Para se fazer este tipo de arranque é apenas necessário um contactor principal e um relé térmico (Figura 2.14) [25].

Pelo que já foi mencionado anteriormente, percebe-se que o arranque direto reduz a vida útil dos enrolamentos do motor e causa um grande stresse nas partes mecânicas do motor. Este tipo de arranque dá origem a um binário muito elevado, que por vezes é mais elevado do que o necessário [25].

Para MITG de baixa potência, com uma frequência de arranque e paragem baixa, esta é sem dúvida uma solução barata e fiável. De ter em atenção que o arranque direto necessita de proteção contra sobrecarga (relé térmico ou disjuntor motor com proteção magneto-térmica),

pois em determinadas situações, com o rotor bloqueado, se não existir uma proteção bem dimensionada, pode conduzir à destruição térmica dos enrolamentos [6].

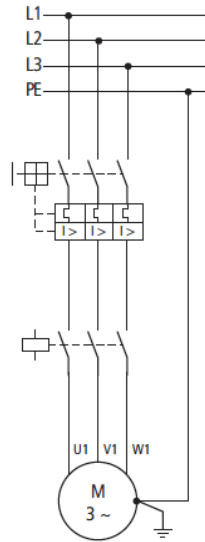


Figura 2.14 – Esquema do arranque direto do motor de indução trifásico [6].

#### 2.4.2 Arranque estrela-triângulo

O arranque estrela-triângulo permite uma redução de tensão de fase, aplicada ao motor, sem modificar o valor da tensão da rede, através da ligação dos enrolamentos estatóricos em estrela no momento de arranque. A tensão de fase de um enrolamento ligado em estrela é a tensão simples e na ligação triângulo é a tensão composta [6]. Este valor pode ser conferido na chapa de características do motor.

A comutação estrela-triângulo consegue assim reduzir  $\sqrt{3}$  vezes a tensão de fase. Veja-se o que se passa com as correntes de arranque, considerando três enrolamentos de um motor ligados em triângulo e os mesmos três enrolamentos ligados em estrela. Se  $Z$  for a impedância equivalente por fase do motor no arranque e  $U$  a tensão composta, as correntes estatóricas no arranque serão, respectivamente [16].

No triângulo e na fase:

$$I' = \frac{U}{Z} \quad (2.7)$$

No triângulo e na linha:

$$I'' = \sqrt{3} I' = \frac{\sqrt{3}U}{Z} \quad (2.8)$$

Na estrela na linha ou na fase:

$$I''' = \frac{U}{\sqrt{3}Z} \quad (2.9)$$

A relação das correntes estatóricas no arranque em estrela e em triângulo é dada pela equação (2.10).

$$\frac{I'''}{I''} = \frac{1}{3} \quad (2.10)$$

Com a ligação estrela/triângulo consegue-se um arranque em que a corrente de arranque é 1/3 da corrente de arranque direto [25]. Com a redução da corrente de arranque reduz-se também o binário de arranque [16]. Assim, assumindo que o binário de arranque é aproximadamente proporcional à tensão de fase:

Em triângulo:

$$T'a \cong K U^2 \quad (2.11)$$

Em estrela:

$$T''a \cong K \left( \frac{U}{\sqrt{3}} \right)^2 = \frac{1}{3} T'a \quad (2.12)$$

Pode-se então verificar que o binário de arranque sofre a redução de 1/3 em relação ao arranque direto em triângulo [6].

Os motores que utilizam este tipo de arranque necessitam de ter acessíveis, na respetiva placa, os seis terminais dos enrolamentos estatóricos. Esses seis terminais são ligados a um comutador apropriado com duas posições de ligado e uma de desligado, como se pode observar na Figura 2.15.

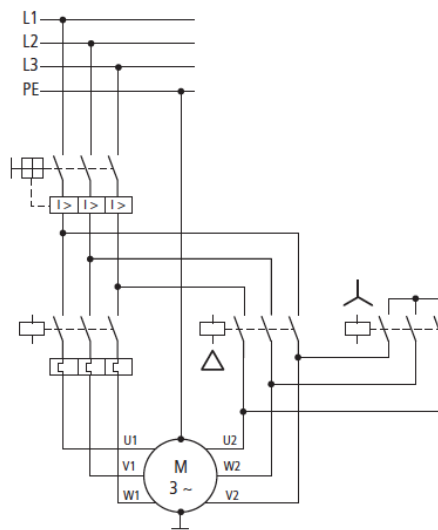


Figura 2.15 – Esquémático do arranque estrela-triângulo do motor de indução trifásico [6].

No arranque estrela-triângulo realiza-se em primeiro lugar a ligação dos enrolamentos em estrela, para o arranque. Uma vez o motor em movimento para a ligação em triângulo. Esta mudança pode ser realizada automaticamente por meio de contactores com temporização [5].

Neste tipo de arranque deve-se ainda ter em conta que pode surgir um problema no que diz respeito ao próprio motor e não à rede, isto é, o motor não dispor de binário suficiente para produzir o próprio arranque (Figura 2.16) [2].

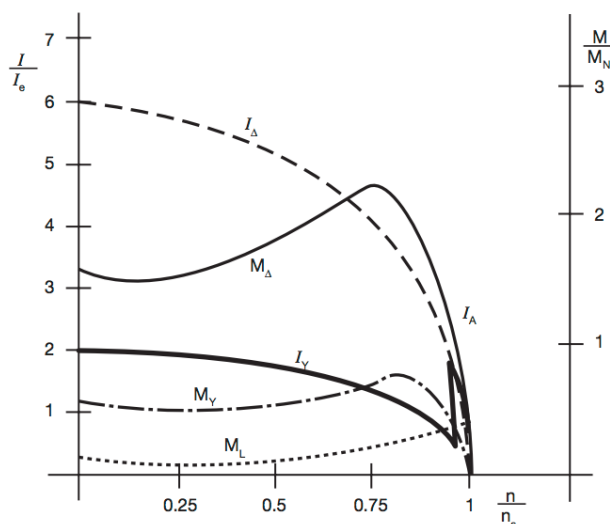


Figura 2.16 – Curvas típicas de corrente e de binário do arranque estrela-triângulo ( $I$  – Corrente do motor;  $I_e$  – Corrente nominal;  $M_A$  – Binário em triângulo;  $M_Y$  – Binário em estrela;  $n$  – Velocidade;  $n_s$  – Velocidade de sincronismo;  $M_L$  – Binário da carga;  $I_A$  – Corrente em triângulo;  $I_Y$  – Corrente em estrela;  $I_A$  – Corrente estrela-triângulo) [5].



Se o arranque não for direto mas por meio de arrancadores, o motor apresenta um binário de arranque inferior ao que teria em arranque direto. O valor do binário do conjunto motor-arrancador definirá a possibilidade de arranque [25].

No arranque estrela-triângulo, a mudança automática do tipo de ligação de estrela para triângulo é normalmente controlada por um relé de temporização no circuito do contactor, sendo que o tempo necessário para esta comutação depende da carga, pois pretende-se que o motor atinja entre 75% a 80% da sua velocidade de funcionamento a fim de, aquando da referida comutação para triângulo, o deslizamento seja já muito reduzido [6]. Relativamente à comutação propriamente dita, de estrela para triângulo, não pode ser feita de forma muito rápida já que causaria um curto-circuito se esta se efetuasse antes de o arco de desconexão se extinguir. Tal problema estará resolvido porque, apesar de os contactores serem rápidos a atracar os seus contactos (não permitindo uma relevante desaceleração do motor, dependendo da carga), o arco de desconexão é ainda mais rápido a extinguir-se (dependendo do motor).

A escolha dos contactores, é feita em função da corrente nominal do motor e da categoria de utilização do mesmo (*standard* IEC/EN60947-4-1).

#### 2.4.3 Arranque com arrancador eletrónico

Em certos casos, o arranque direto e o arranque estrela-triângulo não são a melhor opção, sobretudo para motores de grande potência, isto porque, no arranque o motor de indução trifásico pode provocar quedas na tensão, que podem afetar os dispositivos alimentados pela mesma rede, como por exemplo flutuações de luminosidade, interferências com sistemas de computadores e deslastre de contactores ou relés [25] [5]. Assim, as máquinas e os componentes mecânicos são colocados sob fortes tensões mecânicas devido a picos/transitórios de binário durante o arranque.

Nestes casos o arrancador suave eletrónico (*soft-starter*), representado nas Figura 2.17, Figura 2.18 e Figura 2.19 apresenta-se como uma boa solução pois controla o valor eficaz da tensão aplicada ao motor, permitindo arranques suaves e limitação do binário e da corrente do motor durante o arranque. Assim, nalguns casos, o arranque com recurso a um *soft-starter* é um bom substituto do arranque estrela-triângulo, sobretudo por razões económicas [6].

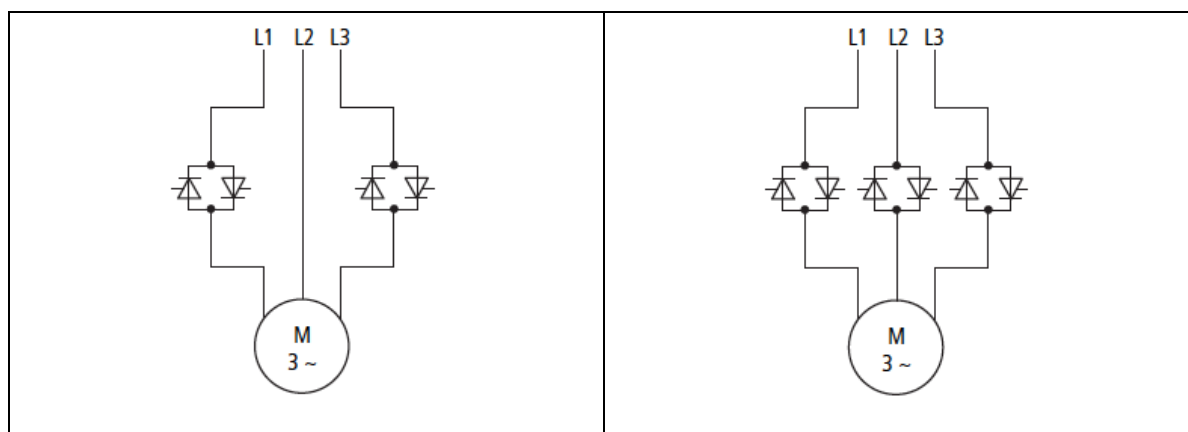


Figura 2.17 – Diferentes modos de ligação de um *soft-starter* [6].

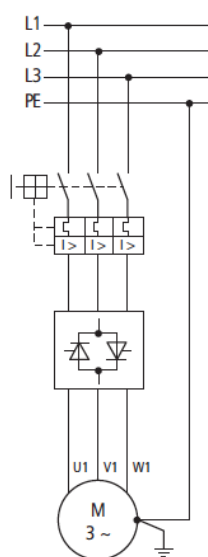


Figura 2.18 – Esquemático do arranque com *soft-starter* do motor de indução trifásico [6].

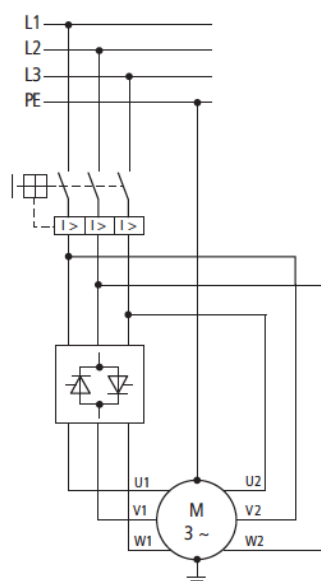


Figura 2.19 – Esquemático da configuração em triângulo do arranque com *soft-starter* do motor de indução trifásico [6].

Na Figura 2.20 apresenta-se o princípio da variação dos binários para o arranque suave de um motor. Começa-se por alimentar o motor com uma tensão reduzida (cerca de 40% da tensão nominal) elevando-se durante o tempo de arranque até ao valor nominal, por exemplo, através de um comando por tirístores ou *triacs* [5].

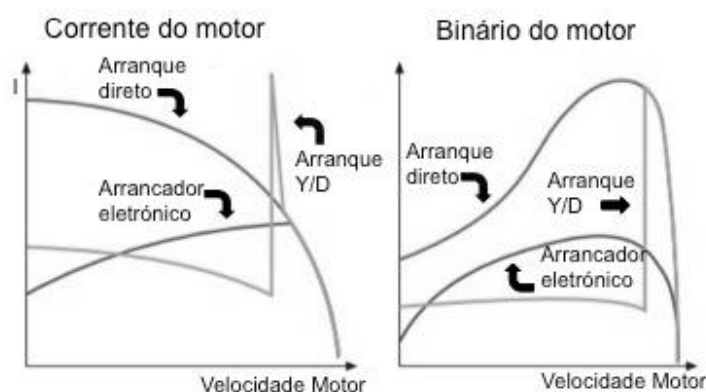


Figura 2.20 – Comparação das curvas de corrente e binário dos arranques direto, estrela-triângulo e com arrancador suave eletrónico [27].

O motor é acelerado ao longo da sua característica, reduzindo-se os picos do binário e aumentando-se a velocidade rotacional linearmente com o tempo de arranque (Figura 2.21).

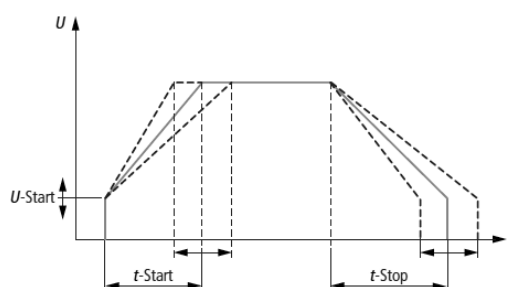


Figura 2.21 – Curva de tensão num *soft-starter* [6].

Do mesmo modo, a corrente aumenta suavemente até se alcançar o binário máximo, reduzindo-se posteriormente para o seu valor nominal. No final, o motor funciona à potência nominal, alimentado à tensão nominal [6].

A tensão aplicada ao motor é controlada pelo ângulo de fase [5]. Para regular o nível desta tensão usam-se semicondutores controlados – tirístores ou *triacs*, sendo o ponto a partir do qual o tiristor começa a conduzir chamado de ângulo  $\alpha$ . Conforme se pode observar na Figura 2.22, se o ângulo  $\alpha$  for grande, a tensão média do motor é baixa, e assim à medida que o ângulo  $\alpha$  se desloca para esquerda o valor eficaz da tensão aos terminais do motor aumenta. Com este método simples pode variar-se a tensão aplicada ao motor de indução trifásico com relativa facilidade.

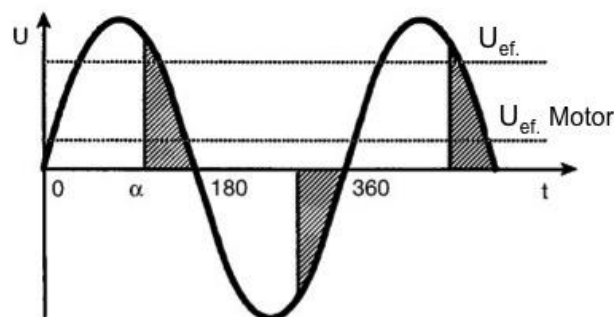


Figura 2.22 – Forma de onda da tensão de alimentação do motor com o controlo do ângulo de fase por *soft-starter* [5].

Tal como no arranque estrela-triângulo a escolha do *soft-starter* está diretamente relacionada com a corrente nominal e com a categoria de utilização do motor, segundo a norma IEC/EN60947-4-2 [6].

Para fazer o arranque dos motores de indução, o *soft-starter* é uma solução, para aplicações com grande carga inercial e velocidade constante, mais barata do que o variador eletrónico de velocidade. Porém, durante o arranque, este tipo de solução injeta correntes harmónicas que põem em causa outros processos, que destroem os bancos de condensadores, razão pela qual não podem ser usados em regime permanente [25].

#### 2.4.4 Arranque com variador eletrónico de velocidade

Ainda acerca da eletrónica de potência existe uma outra solução que permite um arranque suave do MITG: os variadores eletrónicos de velocidade/frequência (Figura 2.23).

O variador eletrónico de velocidade/frequência é um dispositivo eletrónico que controla a velocidade dos motores de MITG, alterando a frequência e a amplitude da tensão que lhes é aplicada, permitindo ao motor ter o binário nominal à corrente nominal desde a velocidade zero até à velocidade nominal [5] [25].

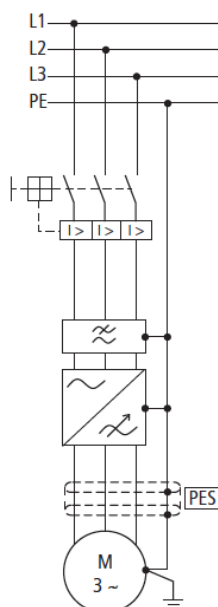


Figura 2.23 – Esquemático do arranque com variador eletrónico de velocidade (VEV) de um MITG [6].

Comparando com as propostas anteriores esta é uma solução mais cara [6], não só na aquisição do variador como na instalação do mesmo, isto porque são necessárias outras medidas adicionais como:

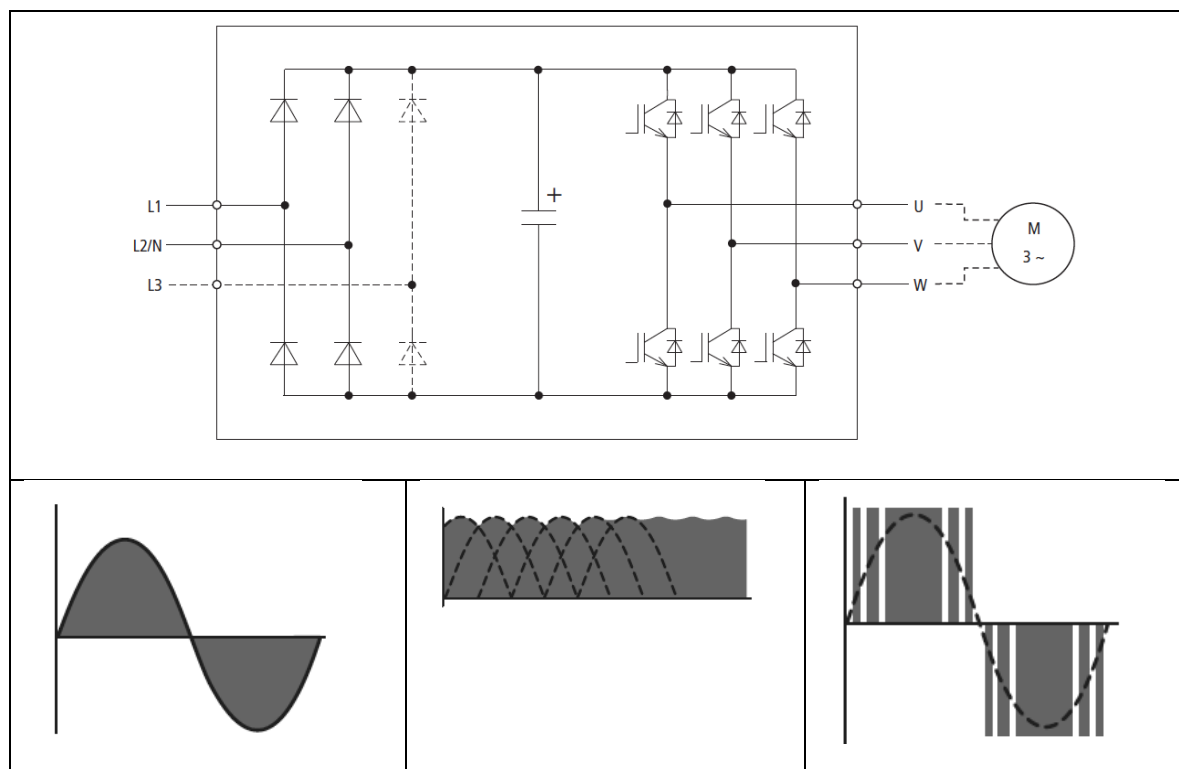
- Cabo de alimentação ao motor blindado;
- Filtro à entrada e à saída do VEV.

Em aplicações muito concretas, como ventiladores ou bombas, esta é uma solução muito interessante, uma vez que permitem reduzir o consumo de energia através da variação de velocidade, bem como aumentar o tempo de vida útil de toda a aplicação.

O variador eletrónico de velocidade é constituído por três partes fundamentais:

- Retificador;
- Barramento DC;
- Inversor (Tabela 2.4) [5].

Tabela 2.4 – Constituição de um variador eletrónico de velocidade [6]



O retificador, constituído por uma ponte de díodos, é ligado à rede de alimentação e gera uma tensão só com semi-ciclos positivos, que alimenta o barramento DC (Figura 2.24).

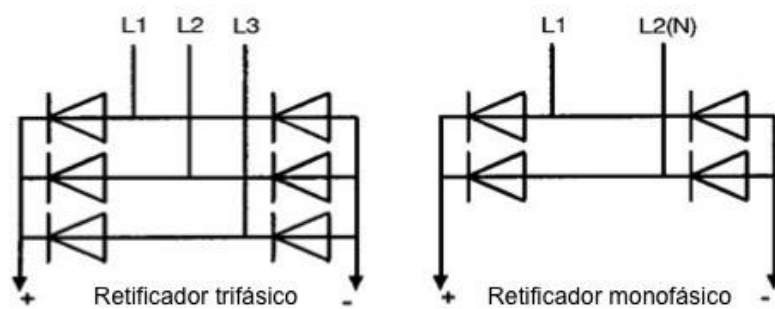


Figura 2.24 – Esquema do retificador trifásico e monofásico [5].

O barramento DC, constituído por bobines e condensadores, por sua vez permite suavizar a tensão de entrada e ainda atenuar picos de corrente (Figura 2.25) [5].

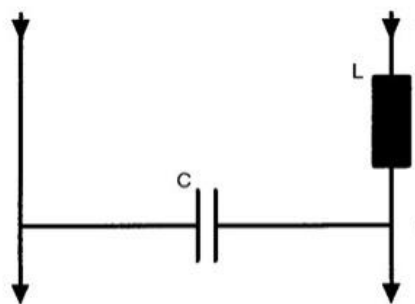


Figura 2.25 – Esquema do barramento DC [5]

Por fim, o inversor recebe uma tensão DC que, através dos IGBTs (utilizados em baixa tensão até potências médias), permite sintetizar uma tensão AC com amplitude e frequências variáveis (Figura 2.26) [5].

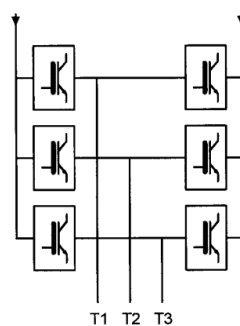


Figura 2.26 – Esquema do inversor [5]

Tal como o *soft-starter*, o variador injeta harmónicos de corrente na rede, estes menos severos que os introduzidos pelo *soft-starter*. No entanto, a sua escolha nem sempre se justifica devido ao seu preço, particularmente se não houver qualquer necessidade ou vantagem em variar a velocidade.

#### 2.4.5 Arranque com autotransformador

O arranque com recurso a um autotransformador permite o arranque do MITG com uma corrente reduzida (Figura 2.27) [5].

Com o autotransformador regula-se a tensão, o que permite limitar a corrente de arranque assim como o binário. Este tipo de arranque é bastante caro [25].

De realçar que o autotransformador é utilizado em aplicações onde o binário de arranque e a inerciada carga acionada pelo motor são baixos [2].

Assim, o MITG é ligado ao autotransformador que, por meio de algumas derivações, regulam a tensão (por exemplo, 50%, 65%, 80%), até atingir os 100%.

Este tipo de arranque pode ainda ser associado ao arranque estrela-triângulo, permitindo uma redução da corrente de arranque em estrela e uma redução do binário em estrela.

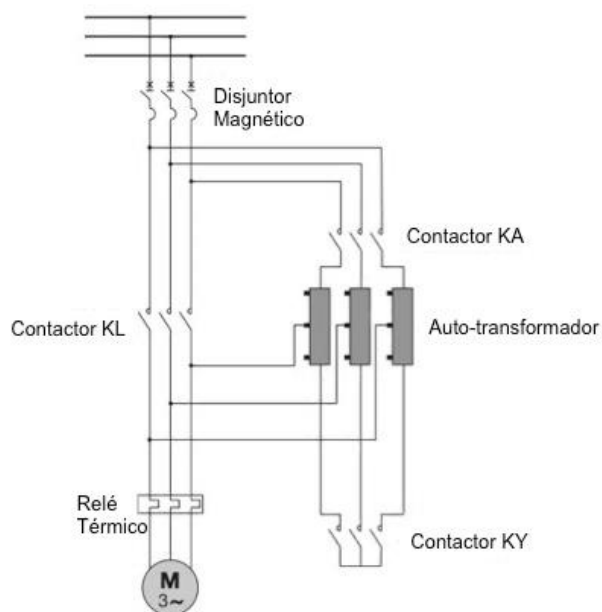


Figura 2.27 – Esquemático do arranque com auto-transformador do MITG [27].

No início os contactores KA e KY são fechados alimentando o motor a uma tensão reduzida, e esta vai sendo aumentada gradualmente permitindo que o motor acelere. Quando o motor estiver a girar a uma velocidade de 80% a 90% da nominal o contactor KY abre, sendo que o motor continua a ser alimentado por uma tensão reduzida fornecida pelo autotransformador. Instantes depois o contactor KL é fechado ao mesmo tempo que o contactor KA abre, isto fará com que o motor seja alimentado diretamente da rede [27].

#### 2.4.6 Arranque com SinuMEC

O *SinuMec* é um dispositivo com tecnologia sinusoidal que permite ajustar a potência do motor 100%, 50% ou 25% da potência nominal [28]. Com o *SinuMec* consegue-se uma corrente de arranque até duas vezes a corrente nominal, uma redução das perdas nos fios elétricos e nos transformadores assim como da energia consumida, aumento do fator de potência, entre outras (Figura 2.28).

A tecnologia *SinuMec* pode ser ligada de duas maneiras ao motor, em linha ou dentro do triângulo (Figura 2.29). Quando ligado em linha, e para uma rede 400V/50Hz, ele pode alimentar o motor com três níveis de tensão 400V/300V/220V. Na ligação dentro do triângulo, e para uma rede 400V/50Hz, o *SinuMec* pode fornecer ao motor três níveis de tensão 400V/310V/290V [28].



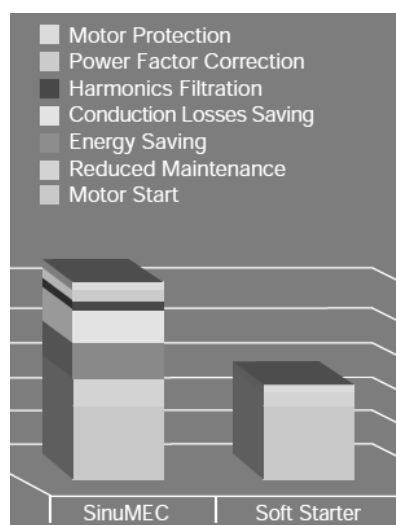


Figura 2.28 – Comparação do SinuMec com o *soft-starter* [28].

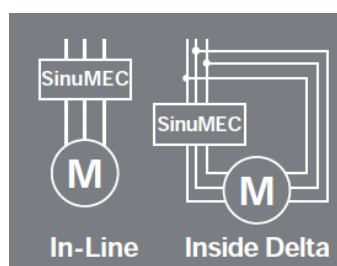


Figura 2.29 – Tipos de ligação do SinuMec [28].

#### 2.4.7 Arranque com enrolamentos parciais

No caso dos motores de duas velocidades (motores *Dahlander*) é possível fazer o arranque com enrolamentos parciais. Estes motores possuem no estator dois conjuntos de enrolamentos (podem ser ligados em série ou paralelo) que compartilham as mesmas posições nas ranhuras e permitem várias combinações de ligação, considerando-se a ligação nominal em D dos dois conjuntos em paralelo [3].

Por possuir mais enrolamentos estatóricos este tipo de motor permite um bastante suave usando-se as diferentes ligações possíveis para limitar a tensão de alimentação do motor e assim reduzir a corrente de arranque [3]. Na Figura 2.30 apresenta-se o esquema de ligação do arranque com enrolamentos parciais.

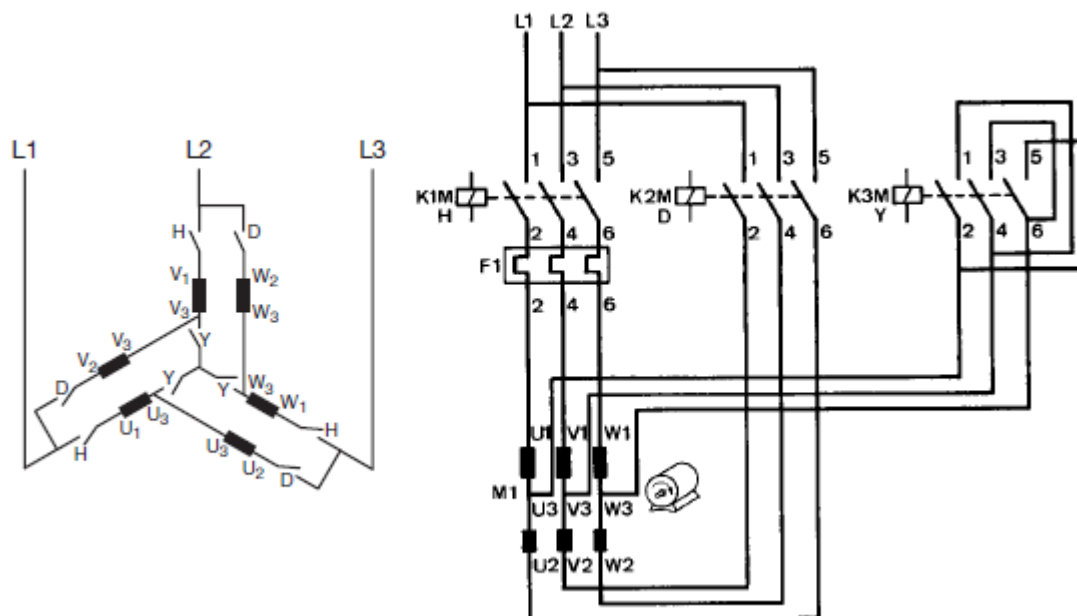


Figura 2.30 – Esquemático do arranque com enrolamentos parciais do motor *Dhalander* [5]

#### 2.4.8 Arranque com bobine em série com o motor

Este método consiste na ligação de uma bobine com um núcleo ferromagnético em série com o motor de indução trifásico (Figura 2.31). Desta forma, a corrente de arranque é limitada em proporção com a tensão (equação (2.13)). Como desvantagem tem-se uma redução quadrática do binário de arranque (equação (2.14)), mas por sua vez este método tem um custo muito baixo comparativamente com outros métodos [25]. De realçar que este método é pouco utilizado.

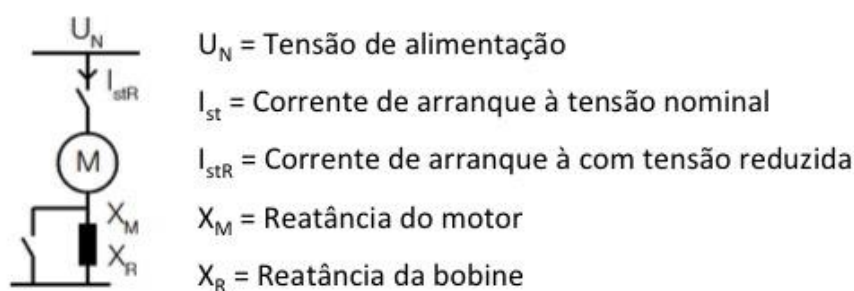


Figura 2.31 – Esquemático do arranque com bobine em série do motor de indução trifásico [25].

$$I_{stR} = \left( \frac{U_N}{X_M + X_R} \right) \quad (2.13)$$

$$T_{stR} = \left( \frac{I_{stR}}{I_{st}} \right)^2 T_{st} \quad (2.14)$$

#### 2.4.9 Arranque com banco de condensadores

O arranque com recurso a um banco de condensadores permite um binário de arranque elevado sem provocar perturbações na rede, isto porque a energia necessária para a magnetização do motor é armazenada no banco de condensadores (Figura 2.32). Após o arranque este banco de condensadores é deslastrado do motor para evitar excesso de compensação [25].

Como é de imaginar, para armazenar tanta energia é necessário um banco de condensadores relativamente grande, o que torna este tipo de arranque caro e com necessidade de um grande espaço para instalar o banco de condensadores. De salientar que este método não é muito utilizado.

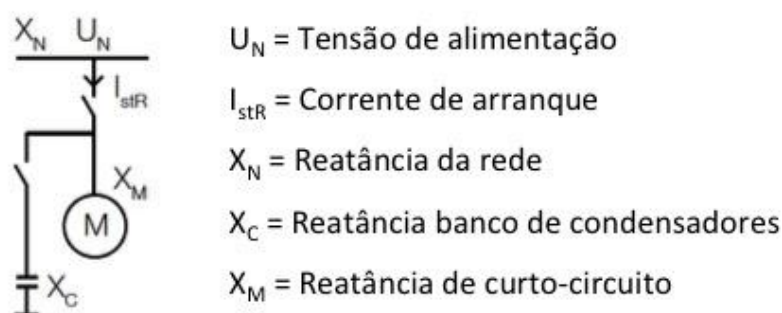


Figura 2.32 – Esquemático do arranque com condensador de arranque do motor de indução trifásico [25].



## Capítulo 3

### DISPOSITIVO

As aplicações de velocidade fixa, acionadas por motores de indução trifásicos, alimentados diretamente da rede (portanto, sem variador eletrónico de velocidade), podem apresentar ao motor uma carga fixa ou variável (binário fixo ou variável) ao longo do seu ciclo de funcionamento. A potência mecânica é igual ao produto do binário pela velocidade angular. Assim, se a potência mecânica solicitada ao motor for inferior à sua potência nominal, a sua carga, que é igual ao quociente entre a potência mecânica desenvolvida e a sua potência nominal, será inferior a 100%. Se a carga fixa for inferior a 50-60%, considera-se que o motor está significativamente sobredimensionado. Se a carga for variável ao longo do ciclo de funcionamento, por exemplo, atingindo valores próximos de 100% nalguns períodos e valores tão baixos como 15-20% noutros, a carga média pode ser relativamente baixa, dependendo do tempo associado a cada nível de carga. A carga média ao longo do ciclo de funcionamento é o chamado fator de carga. Nos casos em que a carga é variável, se os períodos em que a carga é próxima de 100% tiverem uma duração superior à constante de tempo térmica dos motores, não é possível utilizar motores de potência inferior, sendo o sobredimensionamento, em termos de carga média (ou fator de carga), inevitável. Esta é uma situação muito comum em aplicações de movimentação de cargas e fluidos, como por exemplo, misturadoras industriais, gruas e guindastes, correias transportadoras, escadas rolantes, etc.

Como visto anteriormente na União Europeia, estima-se que o fator de carga médio dos motores seja aproximadamente de 60%. Isto significa que grande parte dos motores de indução operam permanentemente com cargas baixas e outros operam alternadamente (ao longo do ciclo de carga) com cargas elevadas e muito baixas. Em geral, quanto menor for o nível de carga dos motores de indução, menor será o seu rendimento e fator de potência, conforme se pode observar na Figura 3.1.

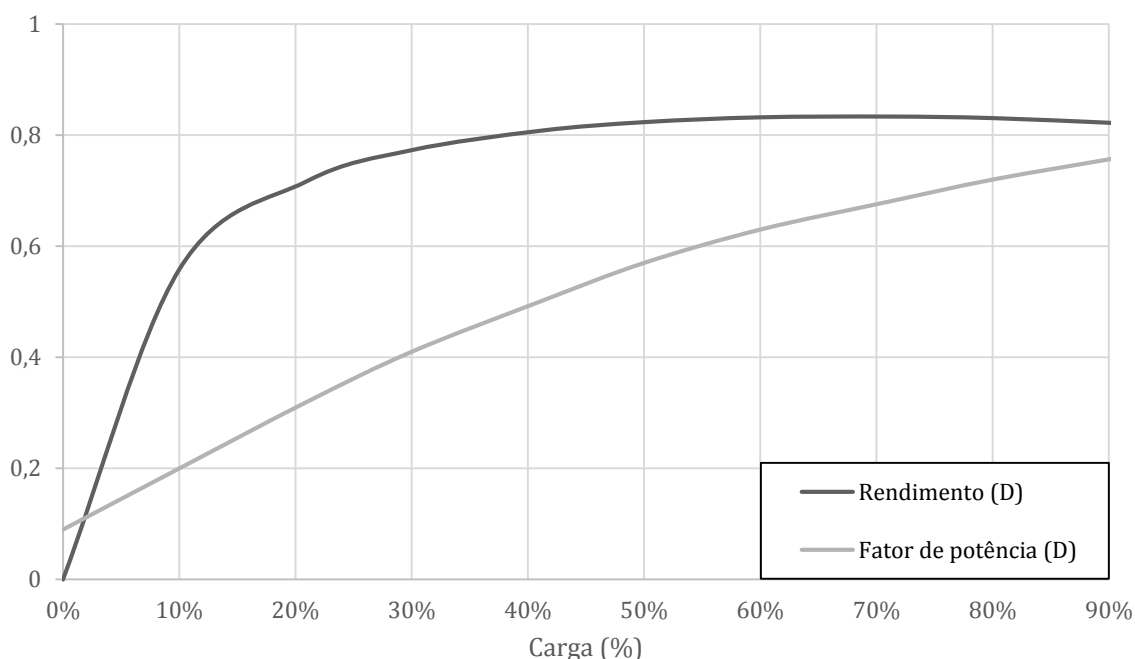


Figura 3.1 – Rendimento e fator de potência obtidos experimentalmente, em função da carga, para um motor tetrapolar de 3 kW.

Porém, através da regulação apropriada do fluxo de magnetização dos motores, em função do seu nível de carga real, é possível maximizar tanto o seu rendimento como o seu fator de potência para cargas baixas. Pelo exposto, há uma clara necessidade de regular o fluxo de magnetização nos motores de indução de carga variável, como forma de maximizar o rendimento e o fator de potência ao longo do ciclo de funcionamento. O dispositivo proposto regula automaticamente o fluxo de magnetização através da comutação suave do modo de ligação dos seus enrolamentos estatóricos.

### 3.1 CONCEITO

O dispositivo eletrónico proposto (Figura 3.2) é inovador, robusto, compacto, barato e de fácil instalação, permitindo regular/alterar (entre dois níveis) de forma automática o nível de tensão aplicado aos terminais do estator em função da carga aumentando assim o rendimento e o fator de potência MITG, nos períodos de carga baixa.

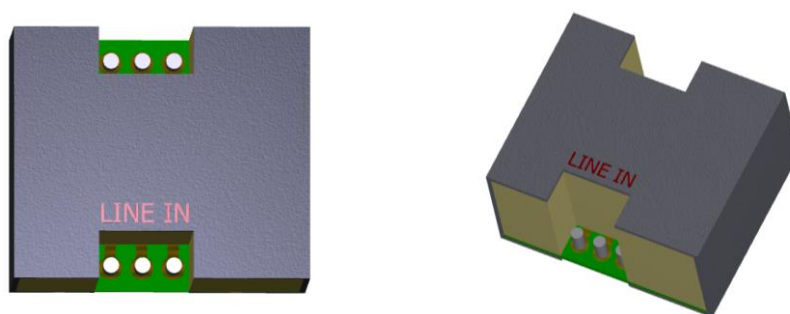


Figura 3.2 – Aspeto final pretendido do dispositivo proposto.

O dispositivo apresenta inúmeras vantagens para os seus utilizadores para além de ser totalmente eletrónico (tecnologia de estado sólido), o que o torna muito compacto. O seu reduzido tamanho e a sua eficiência fazem com que este dispositivo possa ser instalado dentro da caixa de terminais dos motores, não necessitando de espaço dedicado nos quadros elétricos, sendo esta mais uma característica diferenciadora (Figura 3.3).

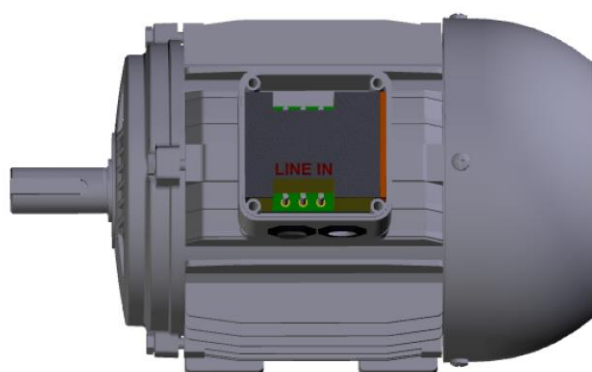


Figura 3.3 – Instalação do dispositivo proposto num MITG.

Com este novo dispositivo é possível realizar arranques suaves e melhorar o rendimento e o fator de potência em regime permanente dos motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo que estejam instalados em aplicações de carga variável e velocidade constante, sem introduzir distorção harmónica (tecnologia sinusoidal), levando a poupanças de energia significativas. Tais poupanças são conseguidas através da monitorização do funcionamento do motor de indução trifásico e consequente gestão automática do modo de ligação dos enrolamentos estatóricos.

Para além disso, o facto de poder ser instalado dentro da caixa de terminais dos motores faz com que se possam retirar os 2 dos 3 (ou mesmo os 3) convencionais contactores e reduzir 50% dos cabos de alimentação do motor necessários ao arranque estrela-triângulo (Figura 3.4). Neste caso para além de um arranque suave este dispositivo permite poupar energia em regime

permanente. Em comparação com os tradicionais contactores eletromecânicos o dispositivo apresentado, e por se tratar de uma tecnologia de estado sólido (não possui partes móveis), apresenta um potencial de fiabilidade e durabilidade muito superior aos primeiros.

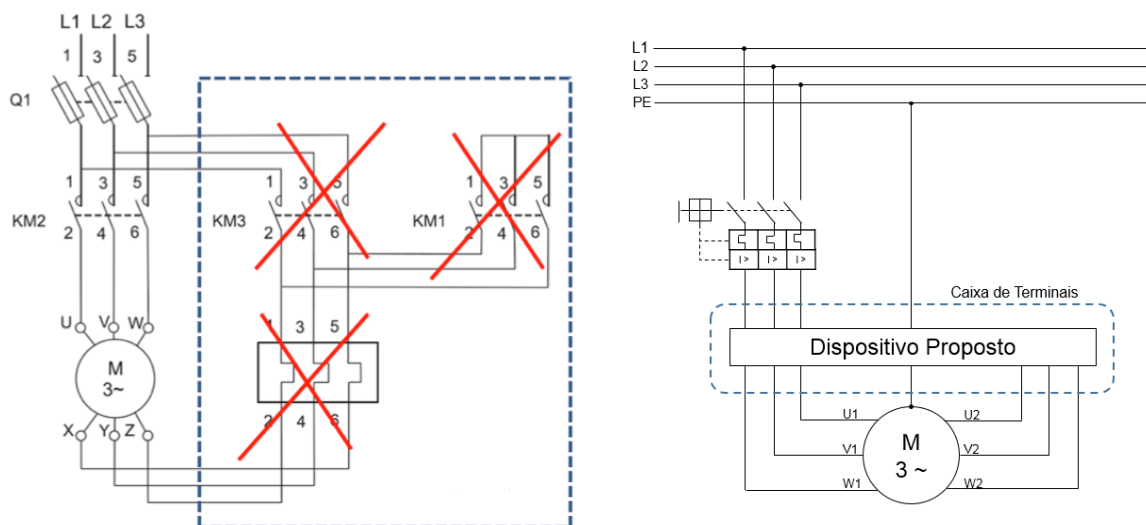


Figura 3.4 – Alteração no esquema de um sistema de arranque Y/D com a utilização do dispositivo proposto

O dispositivo permite ainda algumas funcionalidades muito interessantes, como sejam, estimativa da carga, medição de correntes, tensões e potências, proteção contra sobrecarga, falta de fase e comunicação com redes industriais por cabo ou sem fios. Permite fazer diagnósticos de avarias com base na fusão da análise espectral da corrente e das vibrações mecânicas.

De realçar que esta tecnologia só pode ser instalada em MITG com os seis terminais dos enrolamentos do estator acessíveis na caixa de terminais do motor.

A caixa de ligações dos motores industriais possui no seu interior, para os motores trifásicos de uma velocidade, uma placa de com seis terminais, marcados de acordo com a norma IEC 34-8 (EN 60034-8). Estes bornes destinam-se a ligar entre si os enrolamentos estatóricos do motor e efetuar a ligação à rede elétrica (Figura 3.5) [17].



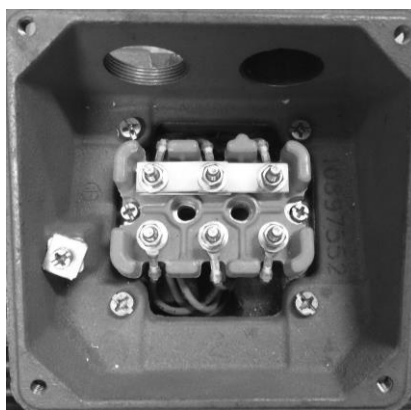


Figura 3.5 – Caixa de terminais de um motor de indução trifásico com rotor em gaiola de esquilo com os seis terminais acessíveis.

### 3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Na construção dos motores de indução trifásicos estes são projetados para trabalhar à carga nominal ou em regimes de carga muito próximo deste, sendo, na maioria dos casos, a ligação triângulo a necessária para atingir a potência nominal. No entanto, existem diversas aplicações onde os motores de indução trifásicos trabalham em regimes de carga muito baixos (cerca de 30%) e isto faz com que o seu rendimento e o fator de potência sejam também eles baixos [2].

O arranque estrela-triângulo é utilizado na indústria para fazer arranques suaves e limitar a corrente absorvida durante este processo. Porém, se se usar o princípio deste método para fazer variar o nível de tensão nos enrolamentos estatóricos, em regime permanente, pode-se melhorar significativamente tanto o rendimento como o fator de potência dos motores. Em regimes de carga baixo, a comutação do motor de triângulo para estrela permite uma redução do fluxo de magnetização e consequente diminuição das perdas no ferro do motor.

De facto, e de acordo com os testes realizados, quando o motor trabalha com uma carga inferior a aproximadamente 35-40% obtém-se maior rendimento se a conexão dos enrolamentos estiver feita em estrela, em vez da ligação em triângulo.

Assim, monitorizando a potência do motor é possível optar pela ligação mais eficiente, procedendo depois à comutação automática, e de forma suave, do tipo de ligação. A comutação, abaixo da carga já referida, permite ainda melhorar significativamente o fator de potência do motor.

Por análise da Figura 3.6, conclui-se que para regimes de carga aplicada abaixo de 40% (ponto  $\alpha$ ) a ligação Y é mais eficiente. Para valores acima de 40% a ligação D é a mais eficiente (Figura 3.7). De salientar que este ponto  $\alpha$  pode variar tanto com o fabricante como com a potência do motor.

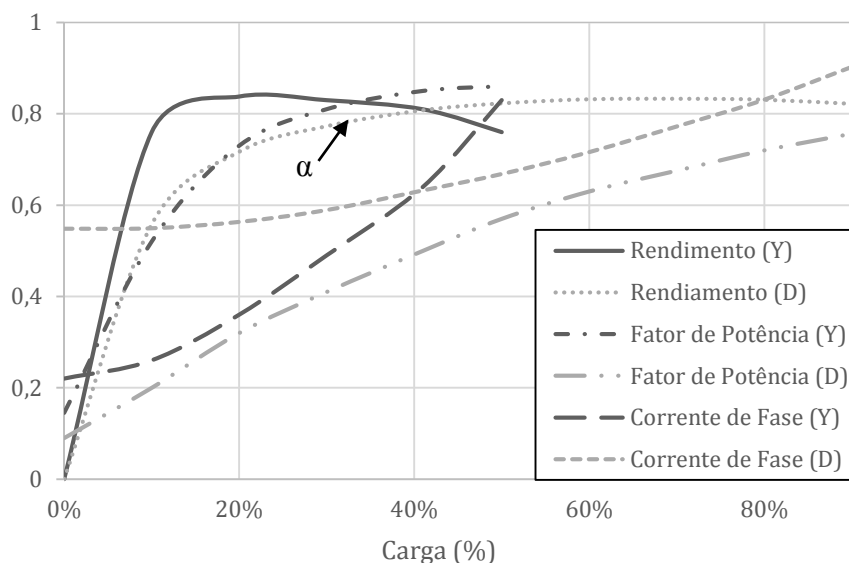


Figura 3.6 – Medidas experimentais de rendimento, fator de potência e corrente de fase (p.u.) para um motor de indução trifásico tetrapolar de 3kW, 400V, 50 Hz

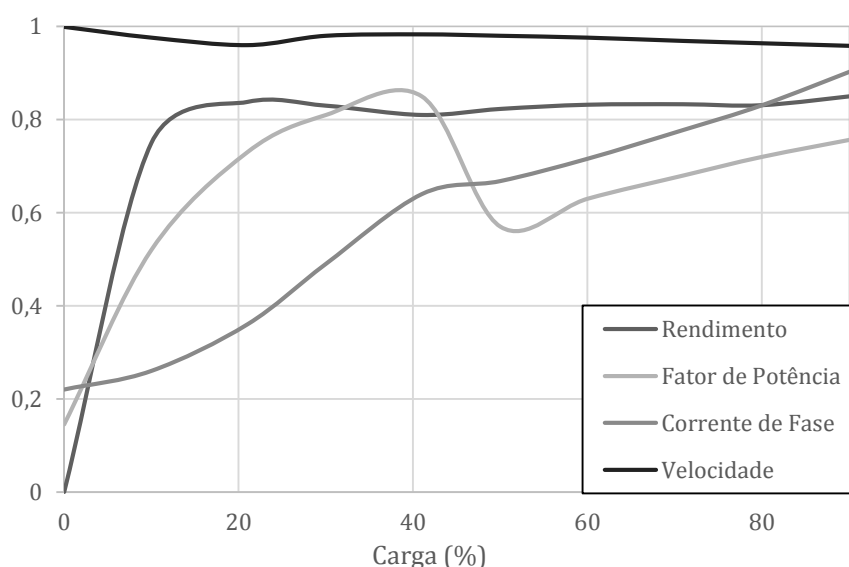


Figura 3.7 – Medidas experimentais de rendimento, fator de potência e corrente de fase (p.u.) para um motor de indução trifásico tetrapolar de 3kW, 400V, 50 Hz com alteração do modo de ligação dos enrolamentos estáticos, em função da carga aplicada

Como esperado, usando a ligação Y para regimes de carga baixos, aumenta-se o rendimento do motor e o fator de potência. O aumento deste último traduz-se numa diminuição da potência reativa, potência esta que para além de não produzir trabalho é fortemente penalizada pelos distribuidores de energia, sendo cobrada ao cliente final o seu consumo excessivo. Assim em regimes de carga baixa existe uma redução consumo de energia reativa no motor o que se traduz em, menos perdas na instalação, assim como em alguns casos (motores operar com

regimes de carga baixos longos) redução da potência do sistema de compensação do fator de potência.

De salientar ainda que quanto maior é a potência do motor e mais baixa é a carga mais elevadas podem ser a poupanças, sendo estas maximizadas quando o motor está a funcionar em vazio (sem carga).

### 3.3 ESTRUTURA DO DISPOSITIVO

O dispositivo proposto foi pensado para ser instalado dentro da caixa de terminais (Figura 3.8). O seu volume é muito reduzido, de fácil instalação, não necessita de espaço dedicado no quadro e pode ser instalado por pessoas sem formação especializada.

A gestão do tipo de ligação dos enrolamentos estatóricos, em função da carga, é feita dentro da caixa de terminais, permitindo poupar no número de contactores e no número de cabos de alimentação do motor.

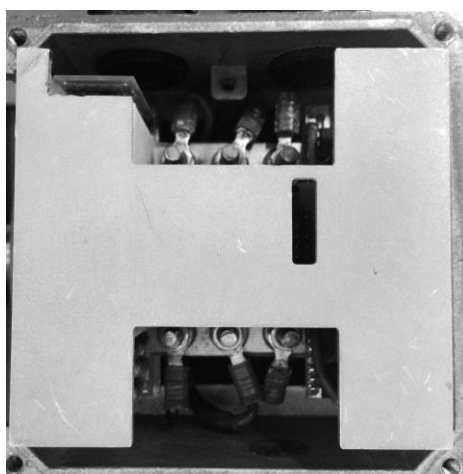


Figura 3.8 – Dispositivo proposto dentro da caixa de terminais de um motor de 4 kW classe IE2.

O dispositivo apresentado tem como principal função gerir e efetuar as ligações Y ou D dos enrolamentos estatóricos do motor através de eletrónica de potência, mais especificamente *triacs*. Por se tratar de tecnologia de estado sólido (*solid state*) o seu tempo de vida é superior à dos contactores eletromecânicos, uma vez que estes usam partes mecânicas com um tempo de vida reduzido.

Assim, o dispositivo proposto pode ser comparado a dois *SSRs* (*Solid State Relay*), pois permite realizar a função destes no arranque estrela-triângulo e porque utiliza o dobro da eletrónica de potência de um destes.

Na Figura 3.9 apresenta-se o aspeto da *PCB* do protótipo do dispositivo onde se podem ver os 6 *triacs*, 3 para fazer a ligação triângulo e 3 para fazer a ligação estrela.

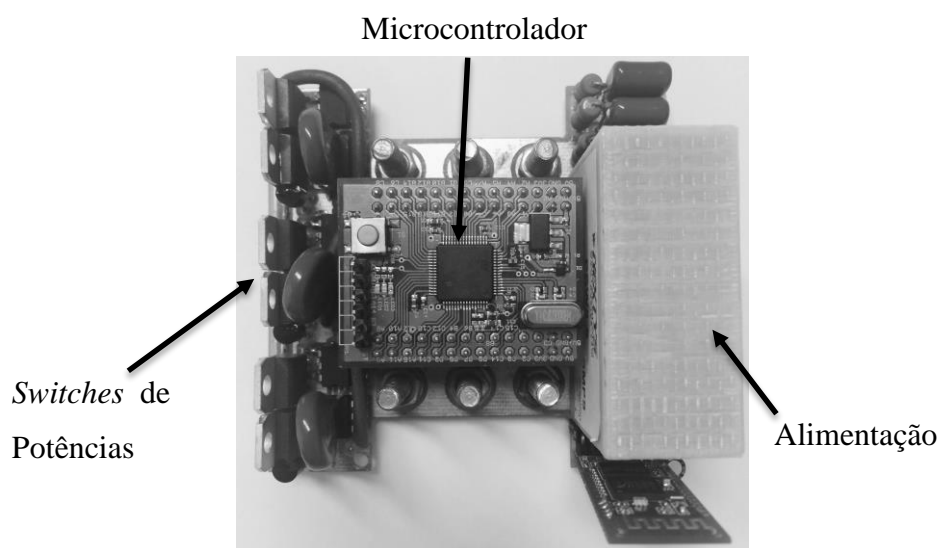


Figura 3.9 – PCB do protótipo do dispositivo proposto.

Uma vez que o dispositivo proposto está diretamente ligado aos terminais do motor este é alimentado diretamente da rede, sem precisar de equipamento adicional. Assim, a partir do momento que é acionado o contactor principal ou o disjuntor motor, o dispositivo é alimentado e faz arrancar o motor com a ligação estrela. Após uma análise da potência consumida ele procede ou não à comutação do tipo de ligação dos enrolamentos estatóricos ( $Y \rightarrow D$ ). É assim perceptível que o comissionamento da potência consumida e a gestão automática do tipo ligação do motor é feito desde o momento em que se liga o motor.

Por estar ligado à alimentação do motor, a fonte de alimentação deste dispositivo possui um *Input* de 400 Vac trifásicos, um *Output* de 5 Vdc, uma potência de 5 W e está preparada para operar apenas com duas fases. Deste modo, em casos de falta de uma das fases o dispositivo parará o motor, podendo o motivo da paragem forçada ser consultado *à posteriori*. Esta fonte é extremamente compacta (22 x 32 x 52mm) e apresenta uma eficiência na ordem dos 70% (Figura 3.10).

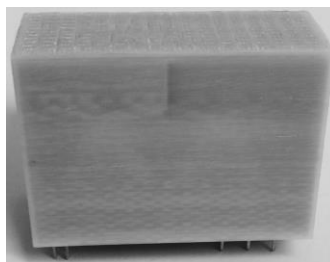


Figura 3.10 – Fonte de alimentação do dispositivo proposto

Como a função principal do dispositivo é controlar o tipo de ligação dos enrolamentos do motor em função da carga aplicada, é necessário utilizar sensores, a fim de calcular a potência ativa consumida pelo motor. Para o efeito são usados sensores de corrente e de tensão.

Para aquisição da corrente, é utilizado o sensor ACS712 (Figura 3.11). Este sensor de efeito de *Hall* tem uma saída de tensão que varia linearmente com a corrente medida [29].

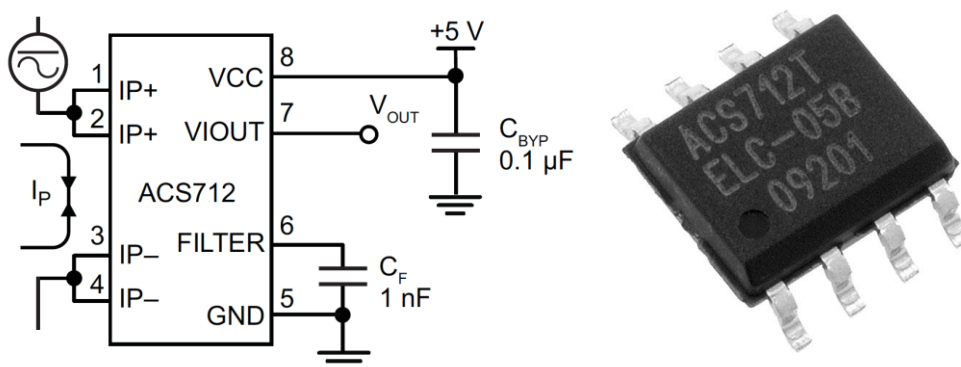


Figura 3.11 – Diagrama esquemático do circuito do sensor ACS712 e o sensor [29]

Para aquisição do valor da tensão foi usado um amplificador operacional com uma variante da montagem diferencial, implementado como se apresenta na Figura 3.12. Este amplificador operacional permite uma operação *rail-to-rail*, que neste caso, uma vez que está a ser alimentado a 5 Vdc, permite um sinal à saída de 0 – 5 Vdc [30]. Neste caso concreto, está ser utilizada uma escala 0 a 3,3 Vdc uma vez que o ADC (*Analogue to Digital Converter*) do microcontrolador possui uma entrada de 3,3 Vdc. Para se conseguir ler os valores do semi-ciclo negativo foi usado um *offset* que é depois anulado em *software*.

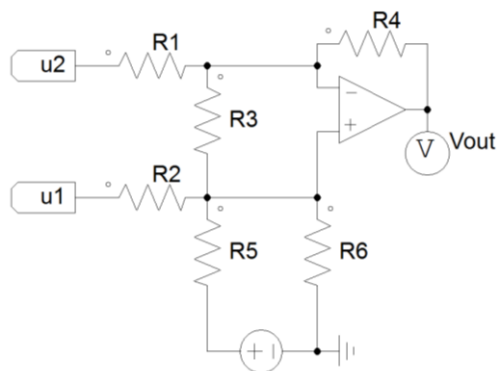


Figura 3.12 – Diagrama esquemático do circuito do sensor de tensão.

O microcontrolador usado é um *ARM Cortex-M4* com 512 Kbits de memória flash e trabalha a uma frequência de 168 MHz. Este possui uma boa relação custo/desempenho e permite um fácil desenvolvimento de aplicações através do *kit STM32F4 Discovery*. Este microcontrolador possui um *ADC* de 12 bits com 16 canais, um *RTC (Real Time Clock)* de baixo consumo, 12 temporizadores de 16 bits e diversos interfaces de comunicação padrão e avançada [31].

Depois de uma primeira abordagem com o *kit STM32F4 Discovery* foi então projetada uma placa de circuito impresso apropriada aos requisitos do dispositivo proposto (Figura 3.13).

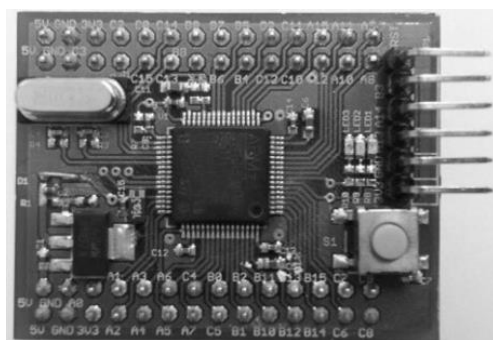


Figura 3.13 – Placa de circuito impresso do microcontrolador

Este microcontrolador tem por função adquirir os valores dos sensores de tensão e corrente usando o *ADC* e proceder posteriormente ao cálculo da potência ativa por enrolamento, da tensão e corrente RMS e do valor do fator de potência. Uma vez que ambos os sensores estão a ler valores em tempo real, o cálculo da potência ativa por enrolamento é feito através do somatório do produto da tensão e corrente instantânea adquiridas (equação (3.1)).

$$P_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n u(k) \cdot i(k) \quad (3.1)$$

Com os valores adquiridos é ainda possível calcular o valor RMS da tensão e da corrente (3.2) por enrolamento. Usando o valor da potência calculada anteriormente e os valores RMS da tensão e corrente é ainda possível aferir o valor do fator de potência ( $\lambda$ ) por enrolamento (equação (3.3)).

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n x(k)^2} \quad (3.2)$$

$$\lambda = \frac{P}{U_{RMS} \cdot I_{RMS}} \quad (3.3)$$

O valor total da potência ativa consumida pelo motor obtém-se através do somatório das três potências ativas por fase (equação (3.4)). É através deste valor de potência total que o microcontrolador afere o *set point* de comutação e procede à mudança, se assim se justificar, do tipo de ligação dos enrolamentos estatóricos.

Assim, o fluxograma do programa do microcontrolador é apresentado na Figura 3.14 . Este é composto fundamentalmente por aquisição das variáveis de tensão e corrente e processamento das mesmas, cálculo da potência ativa consumida pelo motor e comparação com o *set point* de comutação, e por fim alteração do tipo de ligação.

$$P_{total} = P_1 + P_2 + P_3 \quad (3.4)$$

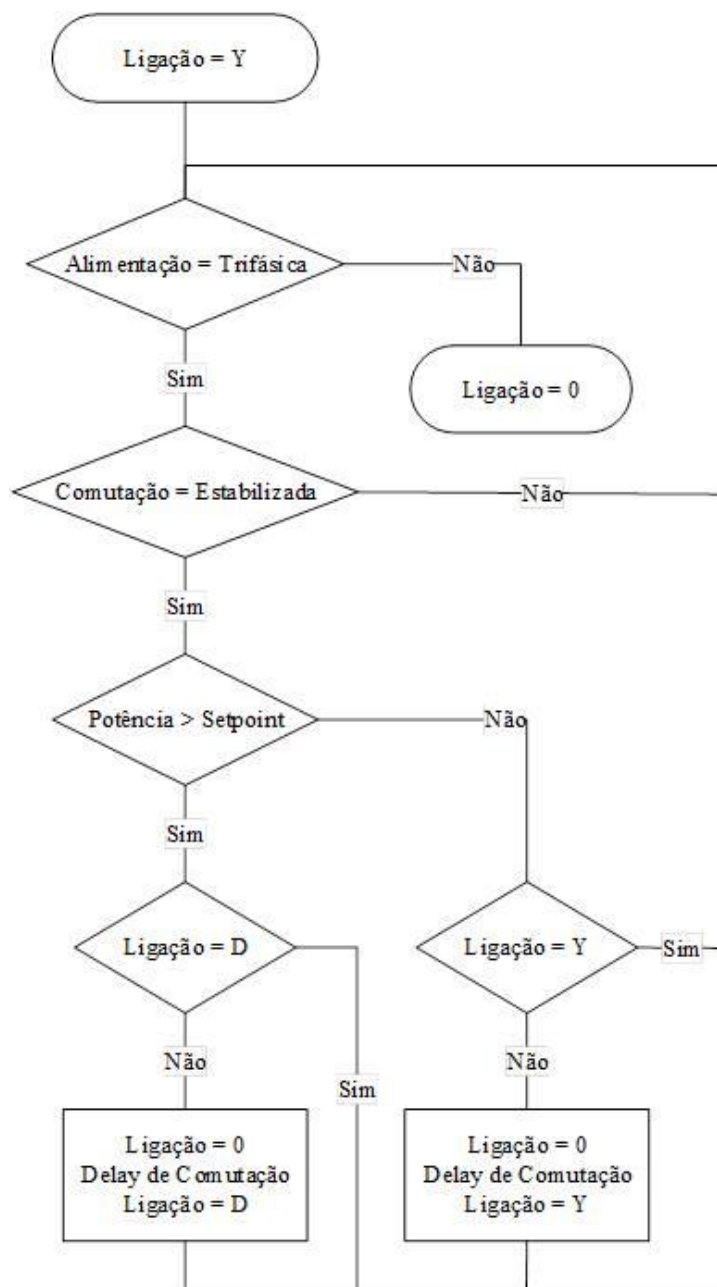


Figura 3.14 – Fluxograma do programa do microcontrolador.

Para efetuar as ligações dos enrolamentos estatóricos de motores com potência  $\leq 11$  kW, o dispositivo proposto utiliza *triacs* (*switches* de potência). Nesta primeira fase ainda se ultimam pormenores do dispositivo que permitem gerir a ligação dos enrolamentos estatóricos, em função do nível de carga de motores com potência  $\leq 11$  kW. Sabe-se, no entanto, que no caso de motores com uma potência  $> 11$  kW e  $\leq 15$  kW os *switches* de potência utilizados terão de ser tirístores (*SCRs*).



Para se efetuar a ligação estrela são utilizados três *triacs* e outros três para efetuar a ligação triângulo, tal como se apresenta na Figura 3.15 e Figura 3.16. Os *triacs* utilizados são os T2550 que operam com correntes de 25 A e possuem uma tensão de bloqueio de 1200 V [32]. Estes *switches* são chamados de *snubberless* e foram especialmente desenhados para operar com cargas indutivas. Esta designação, *snubberless*, advém do facto de estes triacs poderem ser desligados sem um circuito snubber externo. Segundo o fabricante os triacs *snubberless* possuem um declive específico da corrente,  $(dI/dt)_c$ , duas vezes superior ao dos triacs *standard* (para um mesmo tamanho e mesma sensibilidade da gate). Deste modo, qualquer que seja a natureza da carga não existe o risco de acontecer um disparo inesperado se o  $dI/dt_{OFF}$  (3.5)) for inferior ao  $(dI/dt)_c$  especificado. Isto acontece porque o  $(dI/dt)_c$  especificado para um triac *snubberless* é maior do que o declive decrescente da corrente ( $I_{T(RMS)}$ ). [24].

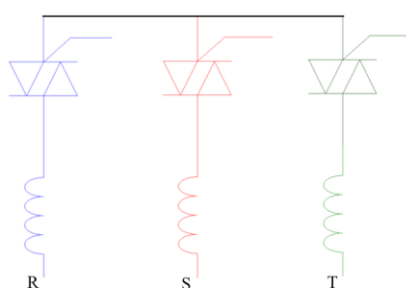


Figura 3.15 – Ligação em estrela dos enrolamentos estatóricos com o dispositivo proposto

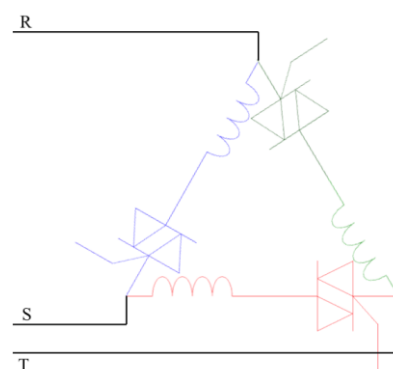


Figura 3.16 – Ligação em triângulo dos enrolamentos estatóricos com o dispositivo proposto

$$dI/dt_{OFF} = I_{RMS} 2 \sqrt{2} \pi f 10^{-3} \quad (3.5)$$



## Capítulo 4

# SIMULAÇÕES DO SISTEMA PROPOSTO

Este capítulo tem como objetivo aferir, através de simulações, as poupanças associadas à tecnologia proposta assim como as comutações suaves conseguidas por meio de tecnologia de estado sólido. Para o efeito será usado o *software* de simulação *PSIM*.

### 4.1 SOFTWARE DE SIMULAÇÃO

O *PSIM* é ferramenta eficaz, simples e rápida que permitiu simular o comportamento de um MITG quando o modo de ligação dos enrolamentos estatóricos deste último é alterado em função do nível de carga e assim perceber quais os ganhos de rendimento e fator de potência associados.

O *PSIM* utiliza um algoritmo de simulação dedicado a circuitos elétricos (método por partes, modelos genéricos e um  $\Delta t$  fixo). Assim, é possível simular circuitos de controlo do tipo analógicos, diagramas de blocos com função de transferência em S ou Z, código personalizado em C ou em MatLab.

O facto de este poderoso simulador trazer nas suas bibliotecas um MITG com os seis terminais dos enrolamentos estatóricos acessíveis, foi o principal argumento para a sua escolha. De realçar que o algoritmo utilizado pelo *PSIM* é bastante rápido, o que se revelou uma mais-valia durante o processo de simulação das mesmas.

Nas simulações foi usado o elemento *Squirrel-cage Induction Machine (linear)* isto porque permite modelizar o MITG de forma muito fácil (Figura 4.1). Apesar disso este modelo não possui parâmetros relativos às perdas no ferro, para tal foram usadas três resistências em paralelo com os enrolamentos. De referir ainda que este elemento não contempla o efeito da saturação daí que este tenha sido ignorado nas simulações.

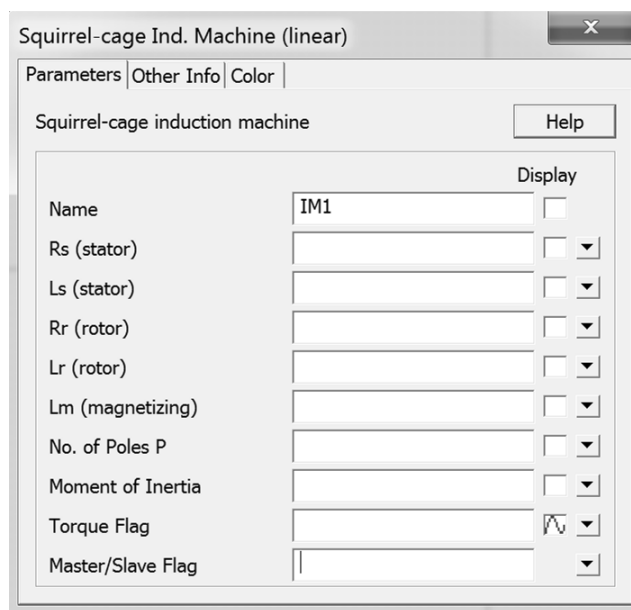


Figura 4.1 – Janela de parametrização do elemento *Squirrel-cage Induction Machine* do PSIM.

## 4.2 ENSAIOS EM VAZIO E CURTO-CIRCUITO

Recorrendo-se a ensaios em vazio e curto-circuito é possível determinar os parâmetros do esquema equivalente referentes ao MITG, necessários também eles ao elemento *Squirrel-cage Induction Machine (linear)* usado nas simulações. Assim, e uma vez que nos ensaios de laboratório seria usado um MITG tetrapolar de 4 kW da Universal Motors os ensaios económicos foram realizados neste mesmo motor.

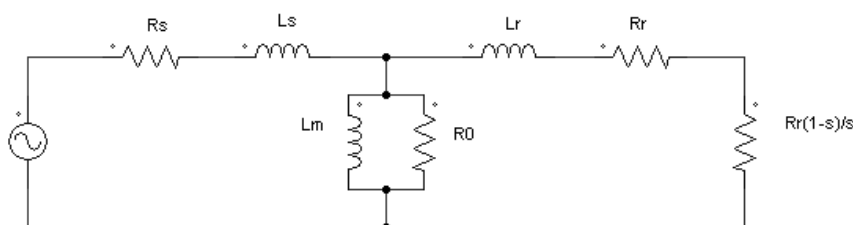


Figura 4.2 – Esquema equivalente por fase do motor de indução trifásico

### 4.2.1 Ensaio em Vazio

Neste ensaio o motor é alimentado à tensão e frequências nominais e posto a girar em vazio (sem carga aplicada ao veio). Como neste tipo de motores a velocidade de vazio é muito próxima da velocidade de sincronismo, assume-se por isso um deslizamento nulo, passando a resistência  $R_r \frac{1-s}{s}$  do esquema equivalente para um valor infinito.

No ensaio em vazio os resultados obtidos com o motor de 4 kW da Universal Motors são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores obtidos no ensaio experimental em vazio do motor de 4 kW.

$U_{0\text{ rms}}$ [V]	$I_{0\text{ rms}}$ [A]	$P_0$ [W]	$S_0$ [VA]	$Q_0$ [var]	$\Phi_0$ [°]	$f_0$ [Hz]
390,73	4,12	250,6	2 790,4	2 789	84,85	50

Partindo dos valores obtidos no ensaio laboratorial do motor em vazio é agora possível calcular a componente de magnetização da corrente absorvida ( $I_m$ ) através da equação (4.1).

$$I_m = \frac{I_0}{\sqrt{3}} \sin \Phi \quad (4.1)$$

A componente magnetizante da corrente é então,  $I_m = 2,371$  A. Por sua vez a reatância de magnetização ( $X_0$ ) é calculada a partir da equação (4.2).

$$X_0 = \frac{U_0}{I_m} \quad (4.2)$$

Então, a reatância de magnetização,  $X_0 = 164,8 \Omega$ . A impedância de magnetização ( $L_m$ ) é dada pela equação (4.3).

$$L_m = \frac{X_0}{2\pi \cdot f_0} \quad (4.3)$$

Pela equação anterior,  $L_m = 0,525$  H. Como referido anteriormente, neste ensaio o motor está a girar sem qualquer carga o que faz com que o deslizamento seja muito baixo ( $< 1\%$ ), traduzindo-se a potência absorvida em perdas no estator (no cobre e no ferro) e perdas mecânicas, desprezando-se as perdas no rotor (no cobre e no ferro). No caso das perdas mecânicas, embora seja possível calculá-las, estas foram desprezadas. Assim, a resistência associada às perdas no ferro ( $R_0$ ) é calculada tendo em conta a componente de perdas da corrente absorvida ( $I_a$ ) (equação (4.4 e (4.5).

$$I_a = \frac{I_0}{\sqrt{3}} \cos \Phi \quad (4.4)$$

$$R_0 = \frac{U_0}{I_a} \quad (4.5)$$

Assim,  $I_a = 0,214$  A e  $R_0 = 1827,79 \Omega$ . Repetindo o ensaio em vazio, agora no *software PSIM*, com os valores calculados é possível comprovar que o comportamento do modelo teórico é igual ao do modelo experimental, sendo  $P_0 = 250,6$  W ((2.1Figura 4.3).

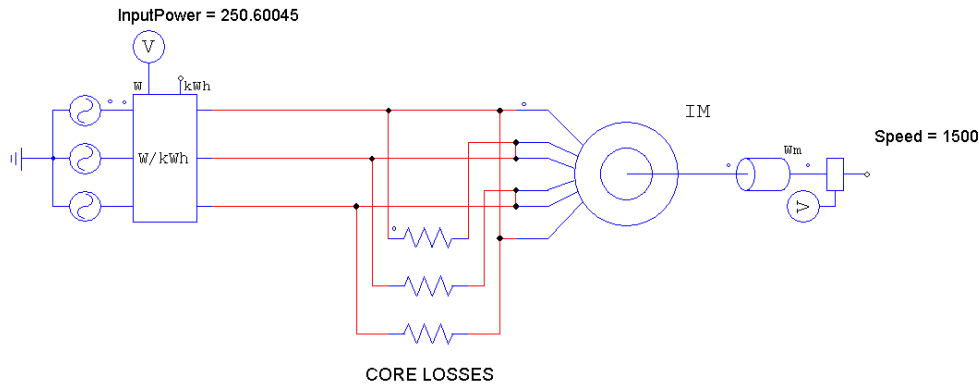


Figura 4.3 – Modelização do ensaio em vazio do motor de 4 kW da Universal Motors

#### 4.2.2 Ensaio em Curto-Circuito (rotor travado)

No ensaio em curto-circuito o rotor do motor é travado, levando a um deslizamento unitário, anulando-se a resistência  $R_r \frac{1-s}{s}$ , o que equivale a um curto circuito. O estator é alimentado a uma tensão reduzida para limitar a corrente absorvida, isto porque quando o  $s = 1$  o motor absorve muita corrente. Neste ensaio o fluxo, que é proporcional à tensão de alimentação, e porque a corrente rotórica é muito superior à corrente de magnetização é muito reduzido, motivo pelo qual se desprezam as perdas no ferro.

Uma vez que o rotor está travado as perdas mecânicas são nulas, sendo a potência absorvida consumida em perdas por efeito de joule, nos circuitos rotóricos e estatóricos.

No ensaio em curto-circuito os resultados obtidos com o motor de 4 kW da *Universal Motors* são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores obtidos no ensaio experimental em curto-circuito do motor de 4 kW

$U_{cc \text{ rms}} [V]$	$I_{cc \text{ rms}} [A]$	$P_{cc} [W]$	$S_{cc} [VA]$	$Q_{cc} [var]$	$\Phi_{cc} [^\circ]$	$f_{cc} [Hz]$
73,88	8,144	512,4	1 042	907	60,54	50

Uma vez que o rotor se encontra travado a potência absorvida é consumida em perdas nos circuitos estatóricos e rotórica.

Uma vez que é possível medir o valor de  $R_s$  ( $R_s = 3,35 \Omega$ ), através da equação (4.6) pode-se calcular o valor de  $R_r$  ( $R_r = 4,38 \Omega$ ).

$$P_{cc} = 3(R_s + R_r) \left( \frac{I_{cc}}{\sqrt{3}} \right)^2 \quad (4.6)$$

A reatância de fuga total ( $X = X_s + X_r$ ) é calculada através da equação (4.7), sendo  $X = 13,68 \Omega$ .

$$X = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3} U_{cc}}{I_{cc}}\right)^2 (R_s + R_r)^2} \quad (4.7)$$

Dentro dos motores polifásicos tem-se a possibilidade de ajustar a resistência e a impedância rotórica. Assim, a *NEMA* define quatro classes projeto, a classe A, a classe B, a classe C e a classe D. Um motor de classe D é caracterizado por um binário de arranque 2,5 a 3,25 vezes o binário nominal e a corrente de arranque 6 a 7 vezes a corrente nominal [19]. Segundo o fabricante, o binário de arranque do MITG utilizado nos ensaios económicos (HE31 112 M1 4) é 3,1 vezes o binário nominal e a corrente 7,1 vezes a corrente nominal [33].

Assim, através da Tabela 4.3 pode-se assumir que a relação entre a impedância de fugas do rotor e a impedância de fugas do estator é de 0,5, assume-se então que  $X_s = X_r = \frac{X}{2}$  (equação (4.8)).

Tabela 4.3 – Distribuição das reatâncias de fugas nos motores de indução [18]

Classe do Motor	Descrição	Fração de $X_1 + X_2$	
		$X_1$	$X_2$
A	Binário de arranque normal, corrente de arranque normal	0,5	0,5
B	Binário de arranque normal, corrente de arranque baixa	0,4	0,6
C	Binário de arranque elevado, corrente de arranque baixa	0,3	0,7
D	Binário de arranque elevado, deslizamento elevado	0,5	0,5

$$X = X_s + X_r \quad (4.8)$$

O valor da indutância referida ao estator ( $L_s$ ) é calculado por meio da equação (4.9), por sua vez a indutância referida ao rotor é igual à anterior ( $L_r = L_s = 0,0218 H$ ).

$$L_s = \frac{X_s}{2\pi \cdot f_{cc}} \quad (4.9)$$

Introduzindo os valores calculados no modelo do *PSIM* e realizando o ensaio em curto-circuito neste obtém-se um comportamento muito próximo do real, assumindo-se que o motor 4 kW se encontra agora modelizado no *software PSIM* (Figura 4.4).

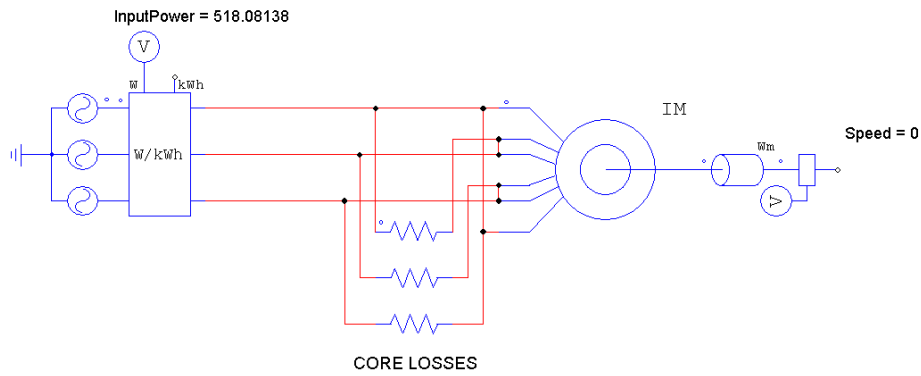


Figura 4.4 – Modelização do ensaio em curto-circuito do motor de 4 kW.

### 4.3 ENSAIOS EM REGIME PERMANENTE

Usando o elemento *Squirrel-cage Induction Machine (linear)* do simulador parametrizado com os valores anteriormente calculados, aplica-se o diagrama de carga presente na Figura 4.5 com o intuito de se perceber quais os ganhos de rendimento e fator de potência associados à implementação do dispositivo proposto no motor de 4 kW da *Universal Motors*. Para o efeito o dispositivo proposto foi também ele modelizado no *PSIM* conforme se apresenta na Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8.

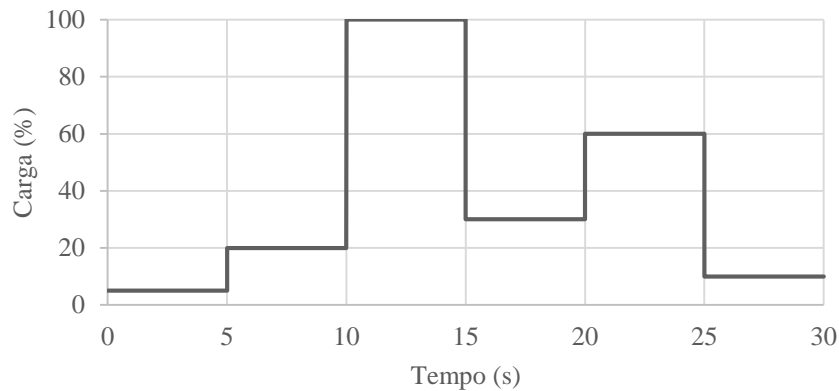


Figura 4.5 – Diagrama de carga utilizado para estudo no simulador *PSIM*



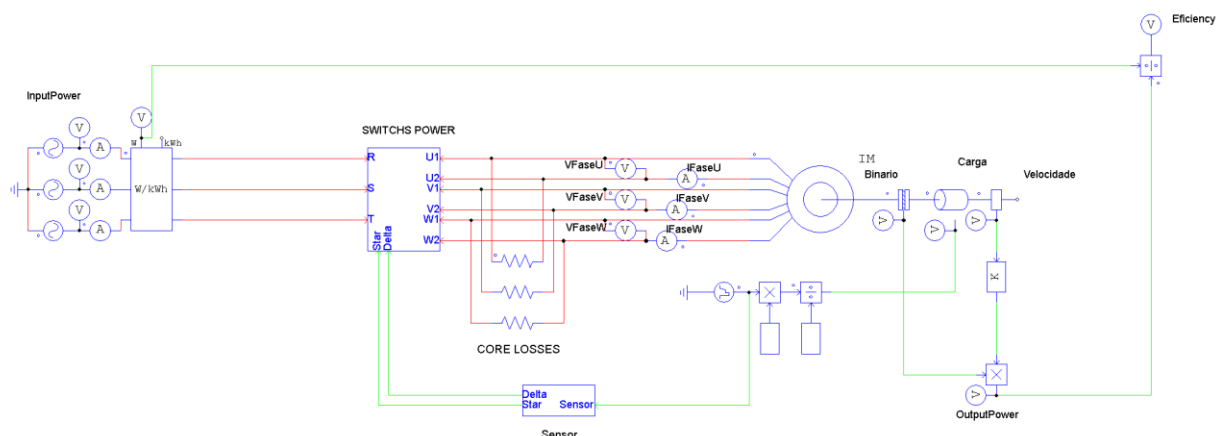


Figura 4.6 – Modelização do dispositivo proposto a gerir o tipo de ligação do motor de indução modelizado, em função do nível de carga.

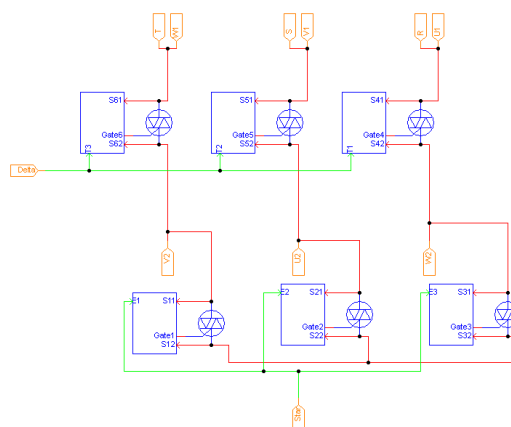


Figura 4.7 – Modelização da eletrónica de potência.

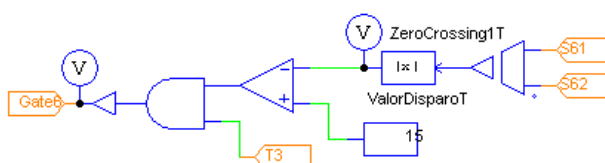


Figura 4.8 – Modelização do *zero-crossing* embebido nos *drivers* de controlo dos triacs.

No caso concreto do diagrama de carga acima apresentado, os resultados obtidos com a simulação comprovam as poupanças associadas à instalação do dispositivo proposto no motor de indução trifásico. Os resultados apresentados revelaram, tal como descrito no princípio de funcionamento do Capítulo 3, que quanto menor é a carga maiores as poupanças, sendo que para cargas acima do *setpoint* as poupanças são nulas.

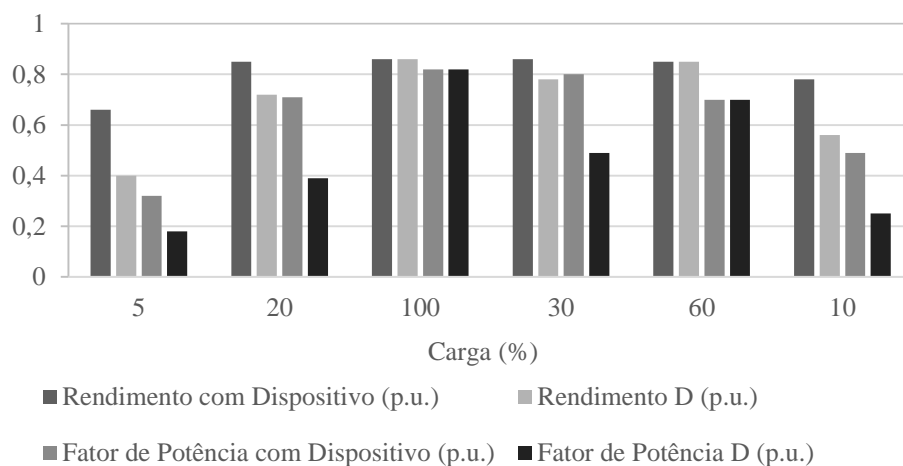


Figura 4.9 – Rendimento e fator de potência do motor modelizado diretamente alimentado da rede e com o dispositivo proposto.

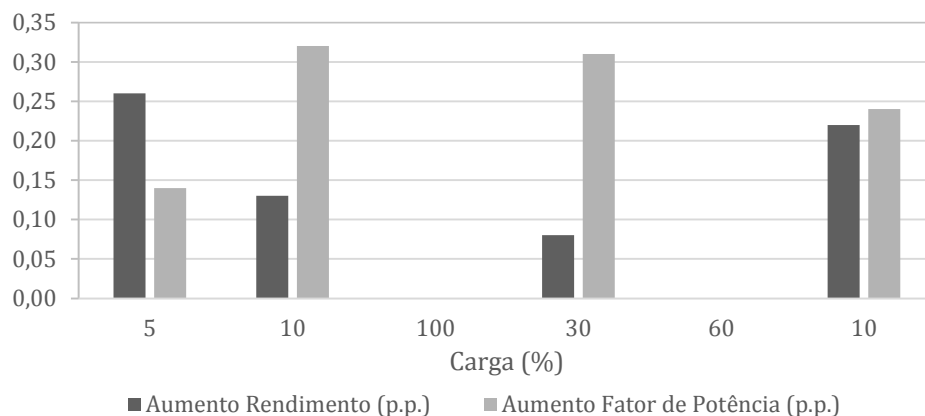


Figura 4.10 – Aumento em pontos percentuais do rendimento e fator de potência para nível de carga expresso no diagrama de carga.

## Capítulo 5

# RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo pretende-se perceber quais as melhorias de rendimento e o fator de potência associados à alteração do modo de ligação dos enrolamentos estatóricos, em regime de carga baixa, nos motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo. Assim, sendo foram realizados diversos testes em motores de classes de eficiência igual e potência diferentes e motores de igual potência mas de classe de eficiência distintas. Em ambos os casos considerou-se a ligação em estrela e a ligação em triângulo, a fim de obter os valores de rendimento e de fator de potência para diferentes níveis de carga. Neste caso só se apresentam resultados para regimes de carga baixa pois é nesses regimes que a tecnologia proposta permite poupar energia.

São ainda apresentadas as poupanças diretas estimadas (em €) para os motores apresentados, dependendo do número de horas que operam por nível de carga nominal. Analisam-se também as poupanças indiretas adjacentes ao aumento do desempenho do motor e da instalação da tecnologia proposta.

### 5.1 MATERIAL UTILIZADO NOS ENSAIOS

Para a realização dos ensaios nos diversos motores foi usada uma bancada constituída por um gerador de indução de 15 kW, um inversor *back-to-back* e um *precision power analyzer* (YOKOGAWA WT 1800) (Figura 5.1). O gerador é quem impõe mecanicamente a carga resistente ao motor e esta carga é controlada pelo inversor através de controlo vetorial. Ao *precision power analyzer* compete medir as variáveis associadas ao desempenho do motor, como sejam: a tensão, a corrente, as potências, o fator de potência, o rendimento, entre outras.

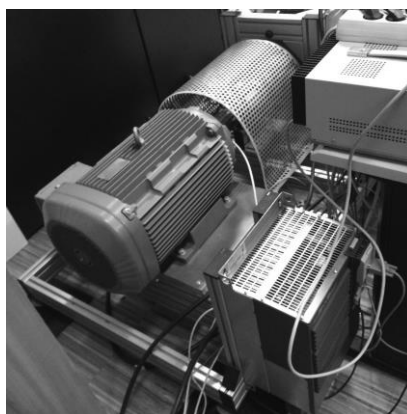


Figura 5.1 – Bancada de testes utilizada (ISR-UC).

## 5.2 MOTOR IE2 DE 4 kW

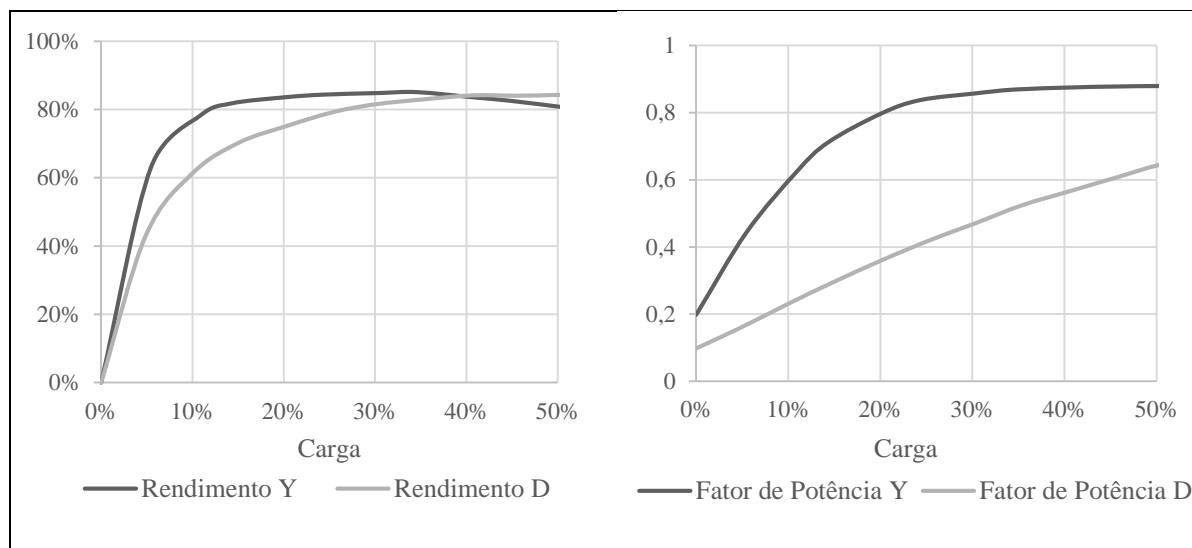
O primeiro motor a ser analisado é um motor tetrapolar de 4 kW, classe IE2 da *Universal Motors*. Este foi o motor que serviu de base para a criação do modelo teórico do simulador *PSIM*. A informação que consta da chapa de características é apresentada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Chapa de características do motor tetrapolar de 4 kW, classe IE2 da *Universal Motors*

V	Hz	min-1	kW	A	Cos $\phi$
$\Delta$ 380 – 415	50	1430	4	8,14	0,81
Y 660 – 690	50	1430	4	4,7	0,81
$\Delta$ 440 - 480	60	1710	4,8	8,14	0,83
IE2 – 86,6% (100%) – 87,2 (75%) – 86,2 (50%)					

Na Figura 5.2 são apresentados os resultados obtidos em laboratório, onde se verifica um incremento do rendimento, decorrente da utilização da ligação Y em comparação com a ligação  $\Delta$ . O incremento do rendimento máximo é igual a 20% para um valor de carga igual a 6% da carga nominal. Por outro lado verifica-se um aumento do valor do fator de potência de pelo menos 0,4 quando a carga se encontra no intervalo entre 11% e 28% da carga nominal.

Pode-se ainda concluir que acima dos 39% da carga nominal deixa de existir incremento do rendimento, todavia o fator de potência apresenta um incremento acima dos 0,2.



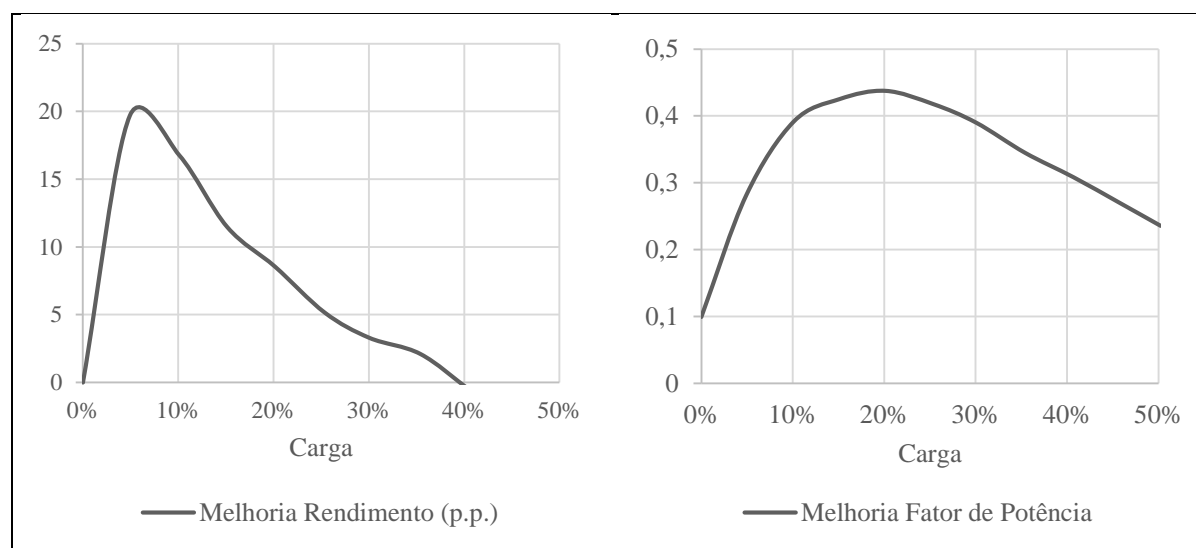


Figura 5.2 – Melhoria de rendimento e de fator de potência em função do nível de carga para a ligação estrela e triângulo, do motor tetrapolar de 4 kW, classe IE2

### 5.3 MOTOR IE2 DE 7,5 kW

Na Tabela 5.2 apresenta-se a chapa de características do motor tetrapolar de 7,5 kW, classe IE2 da WEG. Este apresenta uma potência superior relativamente ao anterior e uma classe de eficiência igual. O objetivo deste ensaio é verificar as diferenças de incremento do rendimento e o fator de potência, assim como perceber se o ponto de interseção das curvas de rendimento se mantém igual.

Tabela 5.2 – Chapa de características do motor tetrapolar de 7,5 kW, classe IE2 da WEG

V – Δ/ Y	Hz	min-l	kW	A	Cos ϕ
380/660	50	1450	7,5	14,9/8,58	0,87
400/690		1455		14,1/8,17	0,86
415/-		1460		13,9/-	0,84
440/-	60	1750	8,5	14,3/-	0,87
460/-		1755		13,8/-	0,86
IE2 – 88,7% (100%)					

Tal como esperado, e uma vez que a potência do motor apresentado aumentou relativamente ao motor anterior, o valor máximo do incremento de rendimento é superior ao anterior, 46% e foi obtido para 10% da carga nominal (Figura 5.3). No que se refere ao fator de potência o incremento é inferior ao apresentado no motor anterior, todavia a 23% da carga nominal atinge-se um incremento de fator de potência de 0,4. Mais uma vez se verifica que para valores de carga superiores a 36% da carga nominal não se verifica qualquer incremento de rendimento. No entanto verifica-se um aumento do fator de potência superior a 0,2 para cargas inferiores a 46% da carga nominal.

Em suma, com o aumento da potência do motor o incremento de rendimento é muito superior. Em contrapartida, o incremento do fator de potência é inferior. Relativamente ao ponto de interseção das curvas de rendimento esta baixa um pouco, mantendo-se contudo entre os 35% e 40% da carga nominal.

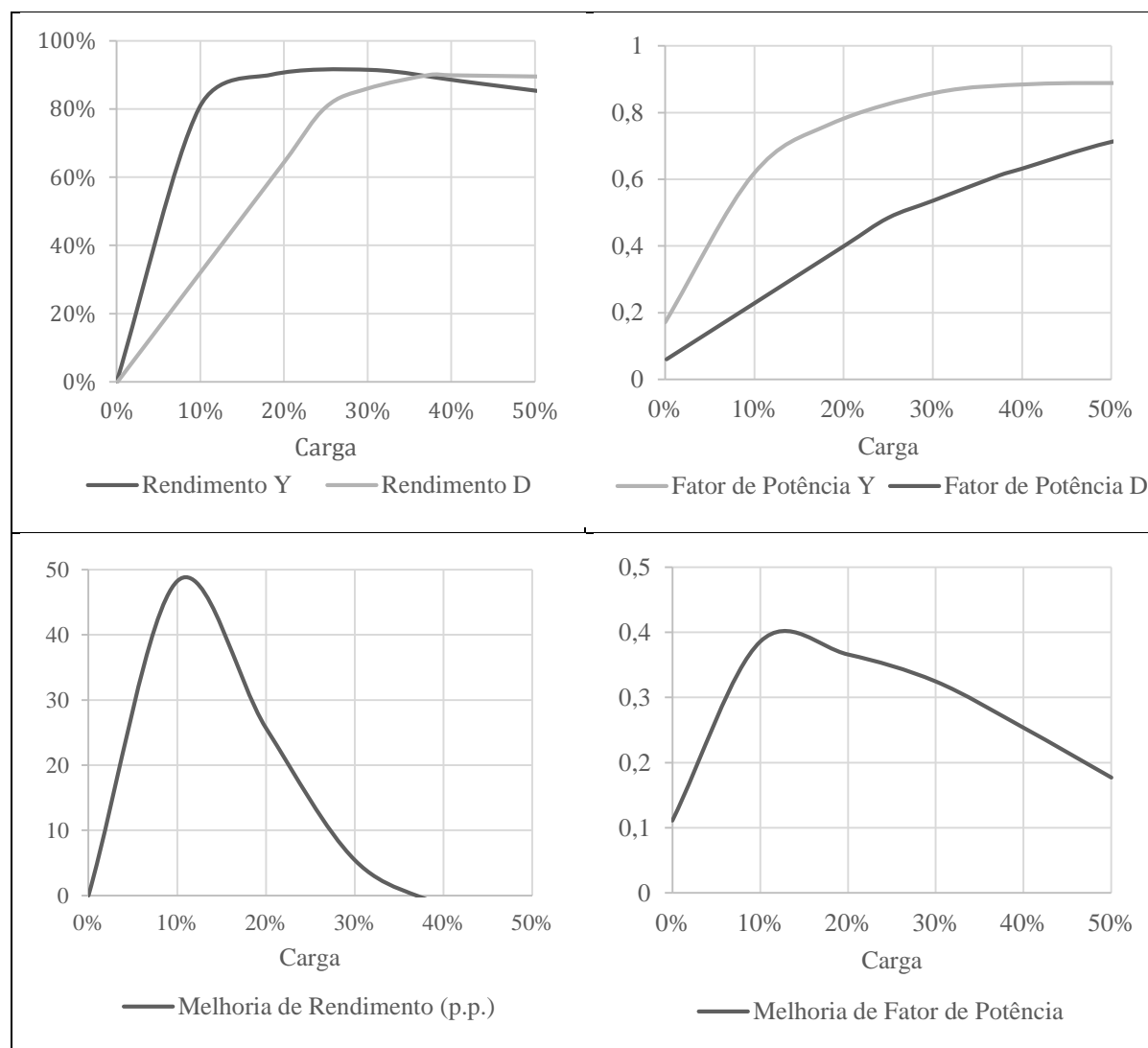


Figura 5.3 – Melhoria do rendimento e do fator de potência em função do nível de carga para a ligação estrela e triângulo, do motor tetrapolar de 7,5 kW, classe IE2

#### 5.4 MOTOR IE3 DE 7,5 kW

Uma vez que a partir de 1 de janeiro de 2015 só é permitido vender motores de classe de eficiência IE3, para aplicações sem variador eletrónico de velocidade (VEV), interessa perceber quais os potenciais incrementos de rendimento e de fator de potência associados à alteração do modo de ligação dos enrolamentos estatóricos dos motores de indução trifásicos, com rotor em curto-circuito em regimes de carga baixa, para motores de potência nominal

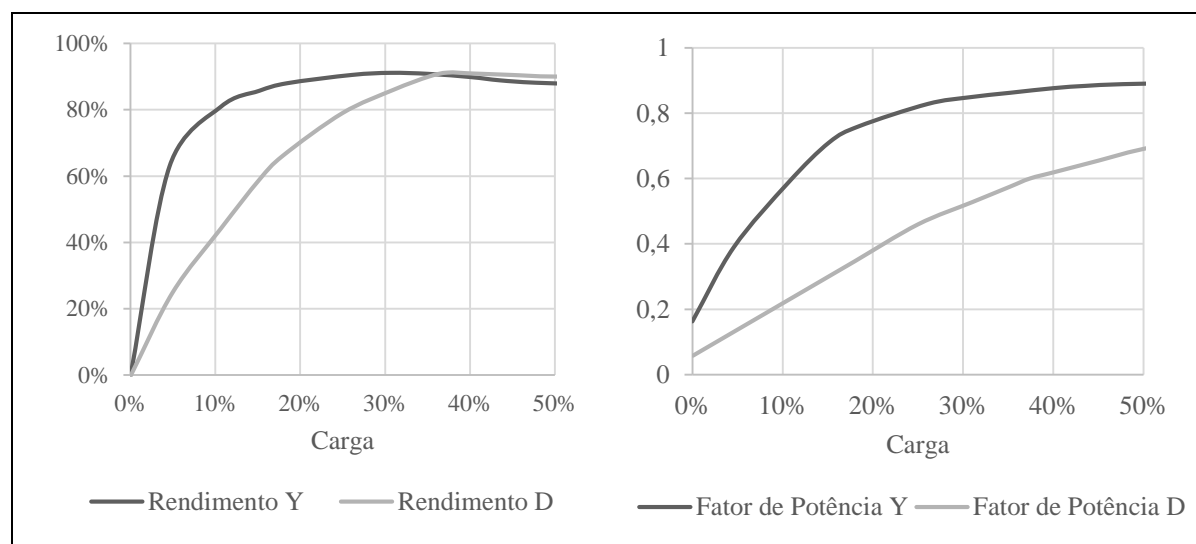
igual e classe de eficiência diferente. Na Tabela 5.3 apresenta-se a chapa de características de um motor tetrapolar de 7,5 kW, IE3 da WEG.

Tabela 5.3 – Chapa de características do motor tetrapolar de 7,5 kW, classe IE3 da WEG

V – Δ/ Y	Hz	min-1	kW	A	Cos ϕ
380/660	50	1460	7,5	14,4/8,29	0,87
400/690		1465		13,9/8,06	0,85
415/-		1470		13,5/-	0,84
440/-	60	1460	8,5	13,9/-	0,87
460/-		1465		13,5/-	0,86
IE3 – 91,2% (100%)					

Uma vez que o motor agora apresentado possui uma classe de eficiência superior relativamente ao anterior, (motor tetrapolar de 7,5 kW, IE2) o incremento de rendimento é inferior. Mesmo assim é muito interessante porque a 6% da carga nominal o incremento de rendimento é de 39% e de 0,27 no fator de potência (Figura 5.4). Este último apresenta um incremento máximo (0,42) a 17% da carga nominal sendo superior ao incremento do motor anterior. É de realçar que este incremento é sempre superior ao motor tetrapolar IE2 de 7,5 kW.

O ponto de interseção das curvas de rendimento é inferior ao anterior, situando-se agora perto dos 35% da carga nominal. Mais uma vez verifica-se que quando o incremento do rendimento se anula o incremento do fator de potência é positivo e neste caso concreto é superior a 0,2.



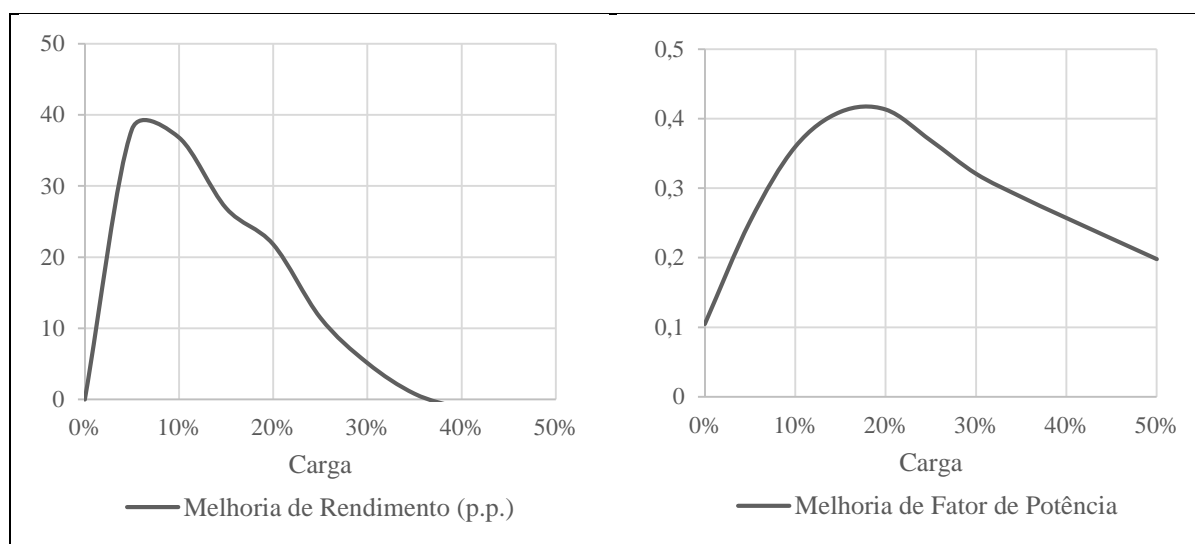


Figura 5.4 – Melhoria do rendimento e do fator de potência em função do nível de carga para a ligação estrela e triângulo, do motor tetrapolar de 7,5 kW, classe IE3

Em jeito de conclusão, com este teste percebe-se que à medida que a potência nominal do motor aumenta, aumenta também o incremento de rendimento, porém o incremento do fator de potência decresce. Com o aumento da classe de eficiência decresce o incremento de rendimento, aumentando no entanto o incremento do fator de potência. O ponto de interseção das curvas de rendimento vai diminuindo tanto com o aumento da potência nominal do motor como com o aumento da classe de eficiência, todavia este deverá manter-se entre os 30% e os 40% da carga nominal.

## 5.5 POUPANÇAS DIRETAS

As poupanças diretas associadas à introdução de um dispositivo com as características apresentadas no MITG são de dois tipos: diminuição da energia ativa consumida (incremento do rendimento) e diminuição da energia reativa consumida (incremento do fator de potência). Em ambos os casos as poupanças serão tanto maiores quanto menor a carga (5% a 10%) e nulas nos casos em que os enrolamentos estatóricos do motor se encontrem ligados em triângulo.

Utilizando os dados obtidos anteriormente e assumindo que os MITG apresentados se encontram instalados numa instalação alimentada a MT (Média Tensão) ou BTE (Baixa Tensão Especial) apresentam-se na Tabela 5.4 e Tabela 5.5 os tarifários para a energia ativa e reativa praticados em Portugal Continental

Tendo em conta que o tarifário para a MT e a BTE depende de vários fatores, como sejam, o tempo de utilização, o período do ano e o período do dia, foi necessário encontrar o preço



médio praticado. Assim, através de uma média aritmética, o valor encontrado foi de 0,1007 € para a MT e de 0,1128 € para a BTE.

O cálculo das poupanças da energia ativa foi então obtido, como se demonstra na equação (5.1), usando como preço por kWh o valor anterior.

Tabela 5.4 – Tarifa transitória de venda a clientes finais em MT [34]

Energia Ativa		(€/kWh)	
Tarifa de longas utilizações	Períodos I, IV	Hora de ponta	0,1287
		Horas cheias	0,1004
		Horas de vazio normal	0,0708
		Horas de super vazio	0,0604
	Períodos II, III	Hora de ponta	0,1316
		Horas cheias	0,1030
		Horas de vazio normal	0,0735
		Horas de super vazio	0,0677
Tarifa de médias utilizações	Períodos I, IV	Hora de ponta	0,1346
		Horas cheias	0,1036
		Horas de vazio normal	0,0720
		Horas de super vazio	0,0615
	Períodos II, III	Hora de ponta	0,1403
		Horas cheias	0,1042
		Horas de vazio normal	0,0760
		Horas de super vazio	0,0677
Tarifa de curtas utilizações	Períodos I, IV	Hora de ponta	0,2025
		Horas cheias	0,1121
		Horas de vazio normal	0,0761
		Horas de super vazio	0,0679
	Períodos II, III	Hora de ponta	0,2022
		Horas cheias	0,1121
		Horas de vazio normal	0,0766
		Horas de super vazio	0,0713
Energia reativa		(€/kvarh)	
	Indutiva	0,0246	

Tabela 5.5 – Tarifa transitória de venda a clientes finais em BTE [34]

Energia Ativa		(€/kWh)	
Tarifa de longas utilizações	Períodos I, IV	Hora de ponta	0,1287
		Horas cheias	0,1004
		Horas de vazio normal	0,0708
		Horas de super vazio	0,0604
	Períodos II, III	Hora de ponta	0,1316
		Horas cheias	0,1030
		Horas de vazio normal	0,0735
		Horas de super vazio	0,0677
Tarifa de médias utilizações	Períodos I, IV	Hora de ponta	0,1346
		Horas cheias	0,1036
		Horas de vazio normal	0,0720
		Horas de super vazio	0,0615
	Períodos II, III	Hora de ponta	0,1403
		Horas cheias	0,1042
		Horas de vazio normal	0,0760
		Horas de super vazio	0,0677
Tarifa de curtas utilizações	Períodos I, IV	Hora de ponta	0,2025
		Horas cheias	0,1121
		Horas de vazio normal	0,0761
		Horas de super vazio	0,0679
	Períodos II, III	Hora de ponta	0,2022
		Horas cheias	0,1121
		Horas de vazio normal	0,0766
		Horas de super vazio	0,0713
Energia reativa		(€/kvarh)	
	Indutiva	0,0293	

$$Poupança \text{ Energia Ativa (€)} = (P(kW)_{\Delta} - P(kW)_{Y}) \cdot \text{Preço kWh} \quad (5.1)$$

No que se refere à potência reativa indutiva só é alvo de faturação a que exceda 30% da energia ativa consumida e esta possui três escalões associados a fatores multiplicativos, como se apresenta na Tabela 5.6 [35]. Assim, utilizando o preço kvarh apresentado na Tabela 5.4 para instalações MT e a Tabela 5.5 para instalações BTE e tendo em conta o fator multiplicativo associado ao consumo de energia reativa indutiva, calcula-se as poupanças (€) associadas ao incremento do fator de potência (equações (5.2) e (5.3)).

Tabela 5.6 – Escalões de faturação de energia reativa indutiva [35]

Escalão	Descrição	Fator multiplicativo
Escalão 1	Correspondente a $\text{tg } \phi$ superior ou igual a 30% e inferior a 40%	0,33
Escalão 2	Correspondente a $\text{tg } \phi$ superior ou igual a 40% e inferior a 50%	1
Escalão 3	Correspondente a $\text{tg } \phi$ superior ou igual a 50%	3

$$\text{Custo Energia Reativa (€)} = ((Q(\text{kvar}) \cdot 3 - P(\text{kW}) \cdot 1,367)) \cdot \text{Preço kvarh} \quad (5.2)$$

$$\text{Poupança Energia Reativa (€)} = C.E.R._{\Delta} - C.E.R._{\gamma} \quad (5.3)$$

Depois de somadas as poupanças (poupanças de energia ativa e poupanças de energia reativa) e multiplicadas pelo número de horas de funcionamento em carga baixa obtêm-se as poupanças apresentadas na Figura 5.5 para o motor de 4 kW, IE2, na Figura 5.6 para o motor 7,5 kW, IE2 e na Figura 5.7 para o motor 7,5 kW IE3, no caso de uma instalação alimentada MT. Na Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10 apresentam-se as poupanças destes motores para uma instalação alimentada BTE.

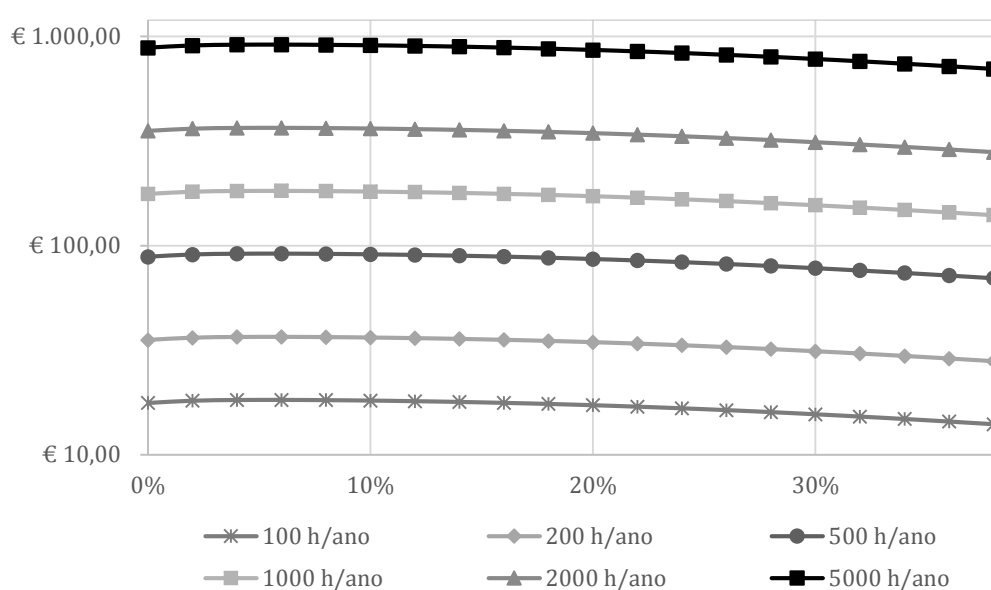


Figura 5.5 – Poupanças estimadas para um motor de 4 kW, IE2 instalado numa instalação alimentada MT por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa.

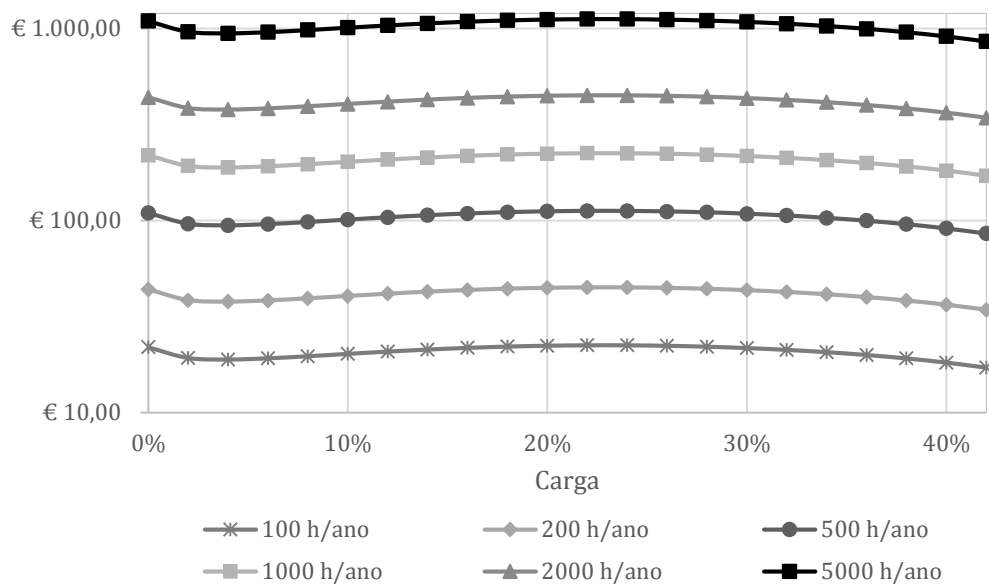


Figura 5.6 – Poupanças estimadas para um motor de 7,5 kW, IE2 instalado numa instalação alimentada MT por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa.

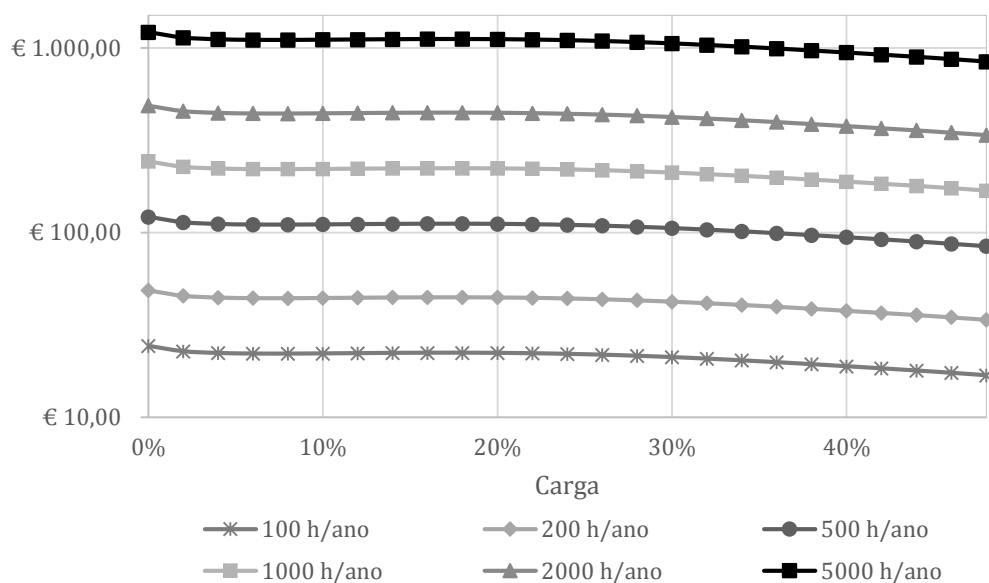


Figura 5.7 – Poupanças estimadas para um motor de 7,5 kW, IE3 instalado numa instalação alimentada MT por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa.

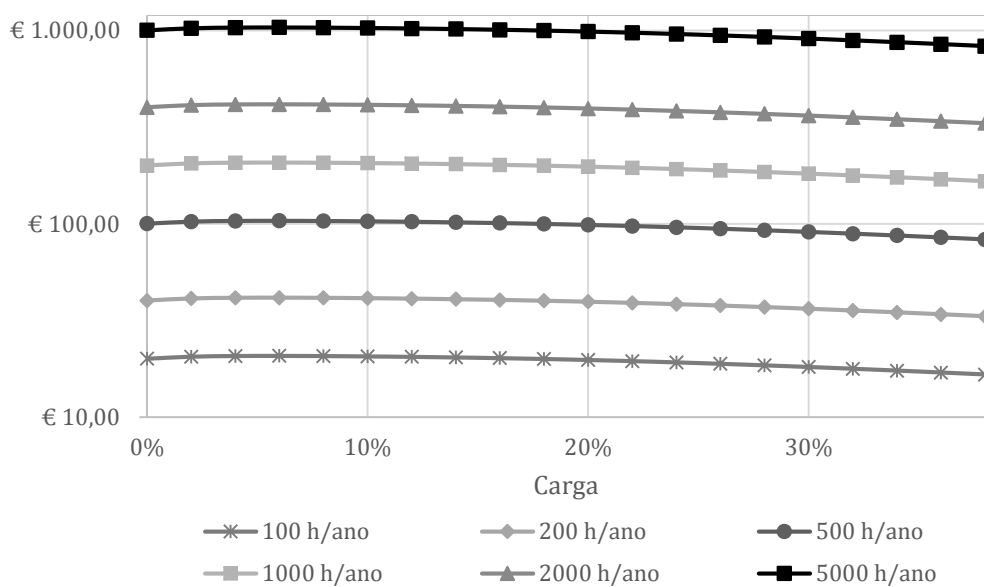


Figura 5.8 – Poupanças estimadas para um motor de 4 kW, IE2 instalado numa instalação alimentada BTE por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa.

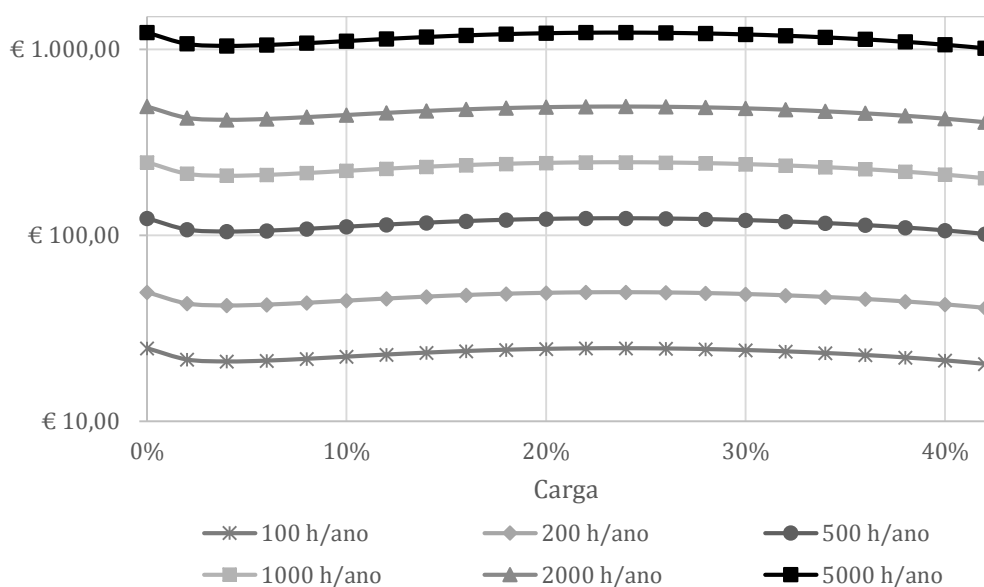


Figura 5.9 – Poupanças estimadas para um motor de 7,5 kW, IE2 instalado numa instalação alimentada BTE por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa.

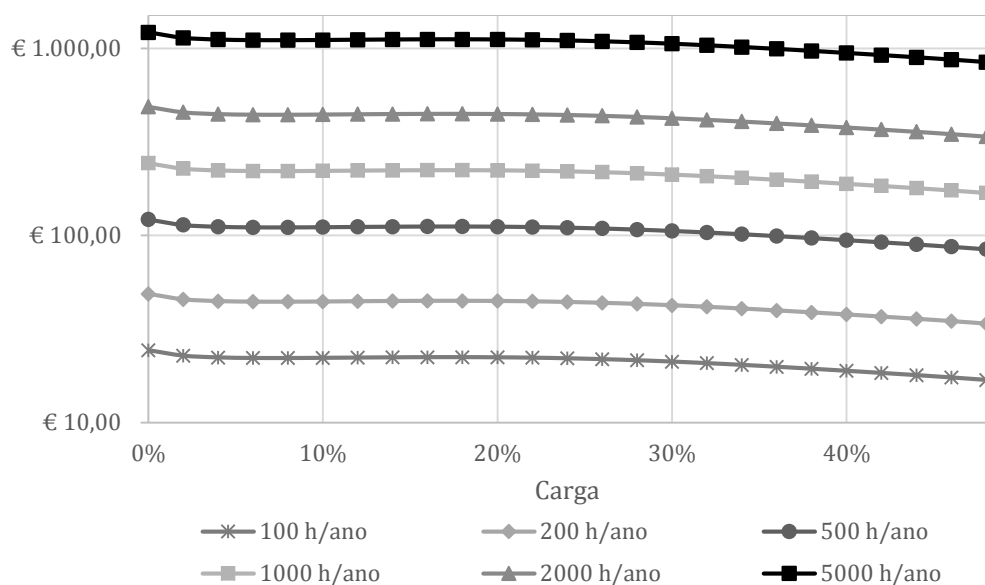


Figura 5.10 – Poupanças estimadas para um motor de 7,5 kW, IE3 instalado numa instalação alimentada BTE por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa.

De realçar que, como visto anteriormente, entre os 35% e os 40% deixa-se de ter incremento de rendimento todavia, e uma vez que existe um incremento de fator de potência elevado, obtém-se ainda um potencial de poupança elevado. No entanto, tal facto só faz sentido para instalações sem correção de fator de potência, caso contrário só se pode estimar poupanças até ao ponto onde o incremento do rendimento é positivo (35% - 40% da carga nominal).

## 5.6 POUPANÇAS INDIRETAS

As poupanças indiretas, que se obtêm por inerência à instalação de um dispositivo com as características do proposto e ainda inerentes ao incremento do desempenho do MITG, são inúmeras todavia por vezes pouco perceptíveis num primeiro olhar, mas muito relevantes comparativamente com as outras soluções no mercado.

Assim, e uma vez que a tecnologia proposta se encontra instalada dentro da caixa de terminais do MITG, é possível poupar no número de contactores e no número de condutores de cobre. Grosso modo, pode-se afirmar que a poupança é de 2 contactores e um relógio ou 3 contactores, um relógio e um relé térmico (no caso de se usar um disjuntor motor para acionar o motor a montante) e poupança de 50% do cobre (Figura 3.4). Todavia esta poupança não é assim tão linear relativamente ao cobre.

Por análise da Figura 2.15 percebe-se que as correntes que passam nos condutores de alimentação do MITG, na ligação triângulo, são  $\sqrt{3}$  mais pequenas que as correntes de linha,

isto porque as correntes envolvidas são correntes de fase. No caso da ligação estrela as correntes que percorrem os condutores de alimentação são correntes de fase. De referir que a corrente nominal ( $I_n$ ) do MITG, ligação estrela, é  $\sqrt{3}$  vezes inferior à corrente nominal na ligação em triângulo.

No que concerne à tecnologia apresentada, as correntes que passam nos condutores de alimentação do motor são as correntes de linha. Assim, a redução do cobre não é de 50% mas sim de 13% (equação (5.4), isto porque, apesar de se retirarem 3 dos 6 cabos (utilizados no arranque estrela-triângulo convencional) de alimentação do motor aumenta-se a secção destes por via de um aumento da corrente que os atravessa.

$$\text{Redução de Cobre (\%)} = \frac{6 - (\sqrt{3} \cdot 3)}{6} \cdot 100 = 13\% \quad (5.4)$$

De ter em atenção que os condutores de cobre apresentam secções padrão no mercado e grande parte dos condutores de alimentação dos motores elétricos são dimensionados para a corrente nominal deste, levando em alguns casos à redução de 50% do cobre (6 condutores passam a 3 condutores da mesma secção).

Nos casos em que a instalação do dispositivo proposto é do tipo *retrofitting* já existem 6 cabos de alimentação ao motor e nesta condição a poupança de cobre é nula. Porém, se se alimentar o motor com 6 condutores de cobre (dois, em paralelo, por fase) ao invés de 3 (um por fase), temos uma redução das perdas no cobre por condutor (do motor até ao quadro elétrico) de 50% (equação (5.5)).

$$\text{Redução Perdas no Cobre (\%)} = \frac{\frac{I^2}{R} - \frac{I^2/2}{R}}{\frac{I^2}{R}} \cdot 100 = 50\% \quad (5.5)$$

Outra das poupanças indiretas, adjacentes à instalação de um dispositivo que permite aumentar o desempenho do motor de indução trifásico com rotor em gaiola de esquilo, é a diminuição das perdas no cobre em toda a instalação. Ao incrementar-se o rendimento e o fator de potência do motor de indução reduz-se a potência aparente absorvida por este último e por inerência diminui-se também a corrente absorvida. Uma vez que esta circula em toda a instalação e as perdas no cobre dependem do quadrado dela (perdas no cobre =  $RI^2$ ), a sua redução conduz a uma diminuição quadrática das perdas no cobre em toda a instalação, reduzindo a queda de tensão e libertando capacidade.

Por norma as instalações, onde estão instalados os motores de indução trifásicos com rotor em curto-circuito, a quem se destina a tecnologia proposta, possuem um transformador na entrada

da alimentação. Os transformadores são máquinas elétricas estáticas (não possuem peças em movimento) destinadas a transformar, através de indução eletromagnética, um sistema de correntes em um ou vários sistemas de correntes alternadas da mesma frequência e de intensidades e tensões diferentes. Esta máquina transfere a energia elétrica de um circuito para outro a que não está eletricamente ligada, com rendimentos elevadíssimos (atinge 99%) [36]. Com o incremento do desempenho do motor de indução (diminuição da corrente absorvida e aumento do fator de potência) temos uma diminuição da queda de tensão aos terminais do transformador (equação (5.6), e das suas perdas no cobre (Figura 5.11).

$$\Delta U = (R_2 \cdot \cos \phi_2 + X_2 \cdot \sin \phi_2) I_2 \quad (5.6)$$

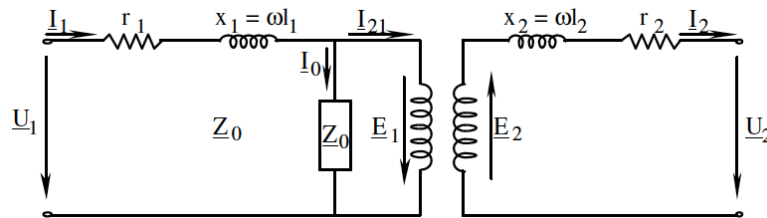


Figura 5.11 – Esquema equivalente por fase de um transformador [36]

Por inerência tem-se que ao diminuir as perdas no transformador aumenta-se o rendimento deste (equação (5.7). De realçar que o rendimento máximo do transformador se atinge quando o  $\cos \phi_2 = 1$  e  $P_{Fe} = R_2(I_2)^2$  (Figura 5.12).

$$\eta (\%) = \frac{\text{potência de saída}}{\text{potência de saída} + \text{perdas}} \quad (5.7)$$



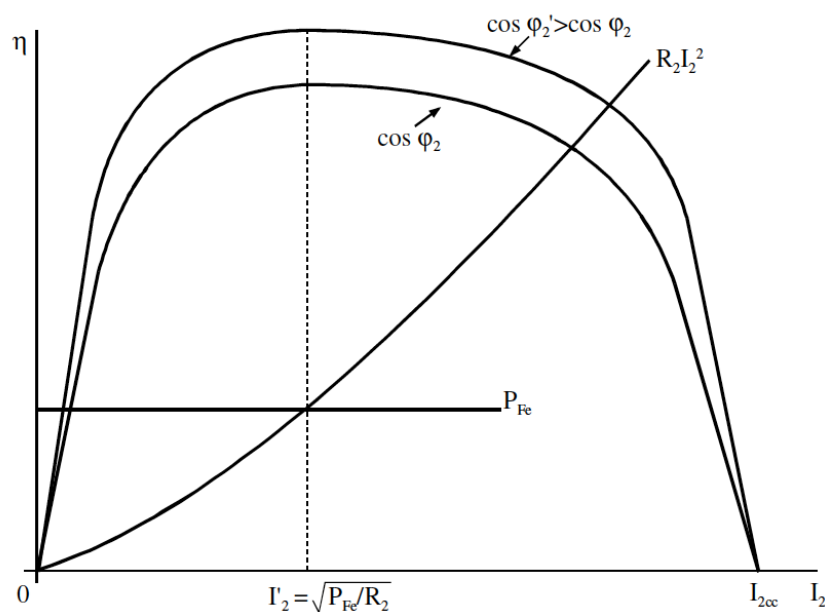


Figura 5.12 – Curvas de rendimento do transformador em função da corrente absorvida [36].

Existem ainda poupanças indiretas relacionadas com o incremento do fator de potência e estas prendem-se com a redução dos custos na sua correção. Com a instalação do dispositivo proposto é possível melhorar o consumo de energia reativa do motor e por consequência de toda a instalação, consumo este que como visto anteriormente é fortemente penalizado pelos distribuidores de energia. No entanto, é muito difícil quantificar estes custos até porque a correção do fator de potência de uma instalação não depende de um só equipamento mas de vários, para além de que o valor do incremento do fator de potência vai depender da carga aplicada ao motor. No entanto, com a instalação da tecnologia proposta, nos casos em que se conheça o regime de carga de uma aplicação e este apresente um comportamento padrão, é possível dimensionar uma bateria de condensadores muito mais pequena do que sem a instalação deste dispositivo.

Nas instalações onde não exista qualquer correção do fator de potência pode ainda optar-se por, em detrimento de um incremento do rendimento, aferir o ponto de comutação pela corrente nominal do motor em estrela e assim incrementar ao máximo o fator de potência.

## 5.7 ANÁLISE DE PAYBACK

Estudadas, anteriormente, as poupanças diretas e indiretas inerentes à instalação e consequente utilização do dispositivo proposto, apresenta-se agora uma análise do tempo de retorno do investimento (TRI) ou “*payback time*” para os motores de 4 kW, classe IE2, e de 7,5 kW, classes IE2 e IE3.

Assume-se que o dispositivo terá um preço de venda ao público (PVP) de 300 € e que no caso dos arrancadores estrela-triângulo o PVP médio, para o motor de 4 kW, é de 60 € e de 90 € para os motores de 7,5 kW. Tem-se então um diferencial de 240 € e de 210 € respetivamente.

Com a tecnologia proposta nos períodos de carga baixa é possível aumentar o rendimento e o fator de potência, traduzindo-se estes aumentos num menor consumo da energia aparente,  $S$ , por parte do motor. Esta redução do consumo de energia traduz-se numa diminuição da corrente que circula em toda a instalação (condutores e transformadores) que por sua vez se traduz numa diminuição das respetivas perdas por efeito de Joule. Todavia, assume-se que o dispositivo apresenta 3 W/A de perdas internas.

Assim, partindo-se do diferencial de preços das tecnologias apresentadas e em função das poupanças diretas anteriormente calculadas (redução do consumo de energia ativa e de energia reativa), da redução das perdas por efeito joule na instalação (assumindo uma resistência típica de  $1 \Omega$ ) e considerando-se as perdas internas do dispositivo apresenta-se um tempo de retorno do investimento<sup>1</sup> para o motor de 4 kW na Figura 5.13, na Figura 5.14 para o motor de 7,5, classe IE2, e na Figura 5.15 um para o motor de 7,5 kW, classe IE3, assumindo-se que estes se encontram instalados numa instalação alimentada à MT.

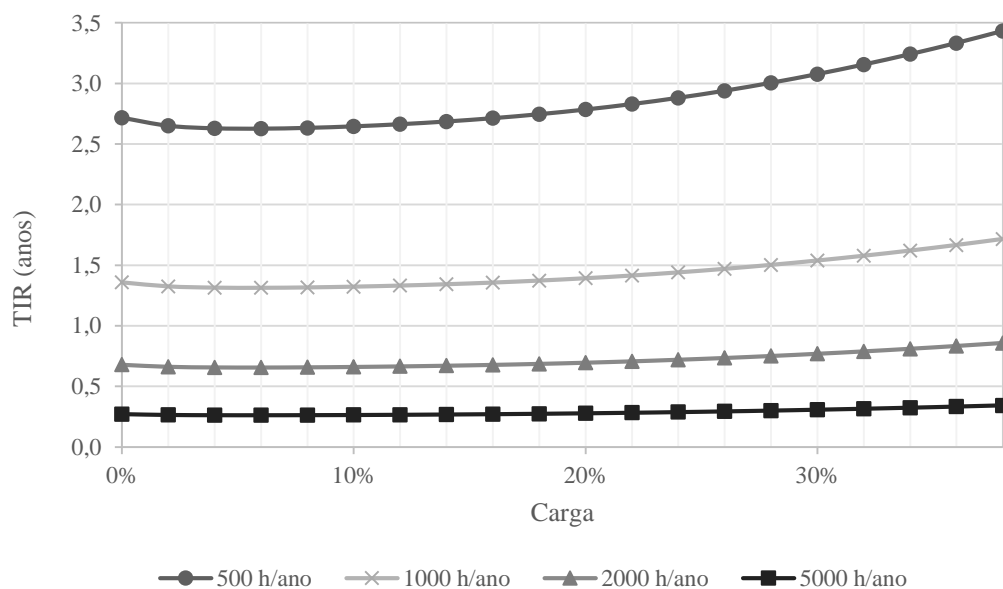


Figura 5.13 – Tempo de retorno do investimento adicional em função do nível de carga para um motor de 4 kW de classe IE2, numa instalação alimentada à MT, para diferentes tempos de operação em carga baixa (em horas/ano).

<sup>1</sup> Nos cálculos apresentados, por opção, não se considerou a taxa de atualização (aproximadamente igual à taxa de juro menos a taxa de inflação) devido ao facto desta não ter um impacto significativo no tempo de retorno do investimento quando este é inferior 3-4 anos.

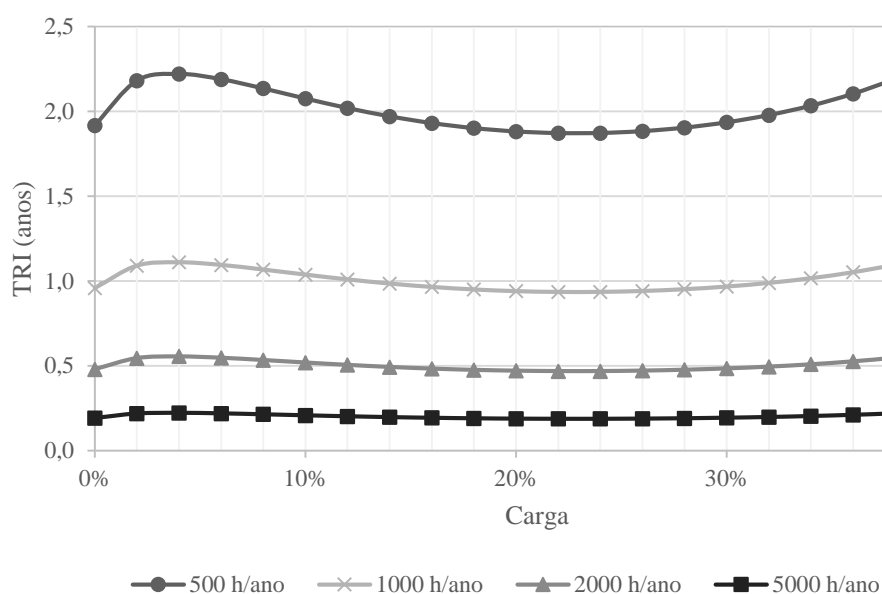


Figura 5.14 – Tempo de retorno do investimento adicional em função do nível de carga para um motor de 7,5 kW de classe IE2, numa instalação alimentada à MT, para diferentes tempos de operação em carga baixa (em horas/ano).

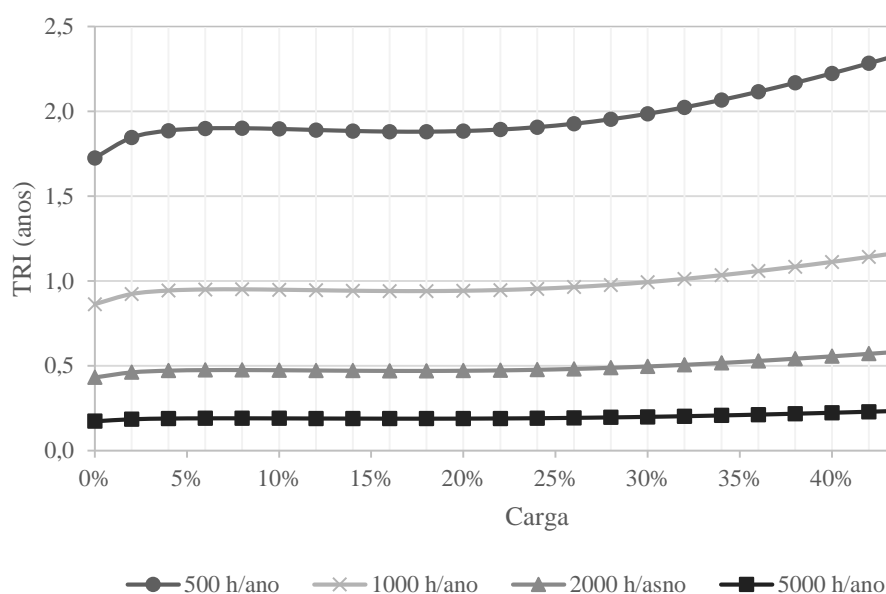


Figura 5.15 – Tempo de retorno do investimento adicional em função do nível de carga para um motor de 7,5 kW de classe IE3, numa instalação alimentada à MT, para diferentes tempos de operação em carga baixa (em horas/ano).

No caso dos motores apresentados se encontrarem instalados numa instalação alimentada à BTE os valores do TRI serão inferiores aos do caso anterior, conforme se pode observar nas Figura 5.16, Figura 5.17 e Figura 5.18.

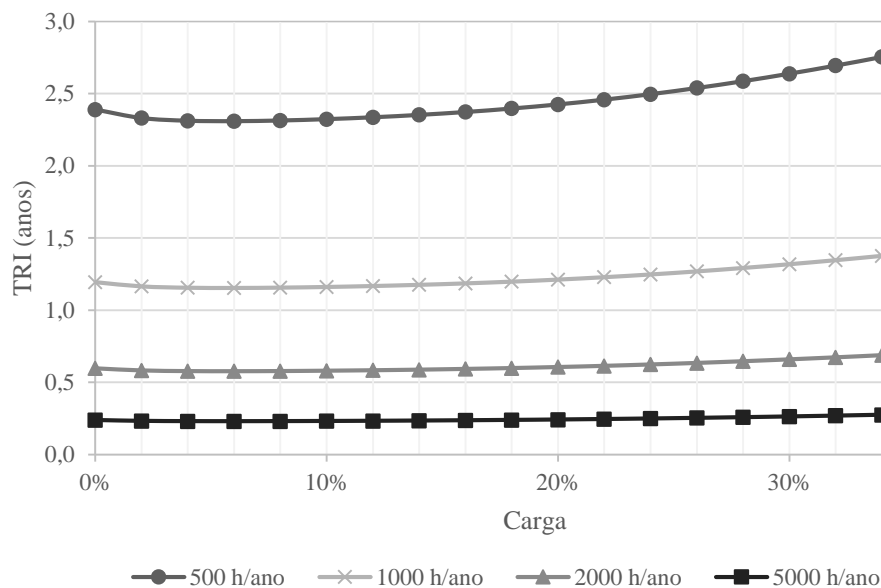


Figura 5.16 – Tempo de retorno do investimento adicional em função do nível de carga para um motor de 4 kW de classe IE2, numa instalação alimentada à BTE, para diferentes tempos de operação em carga baixa (em horas/ano).

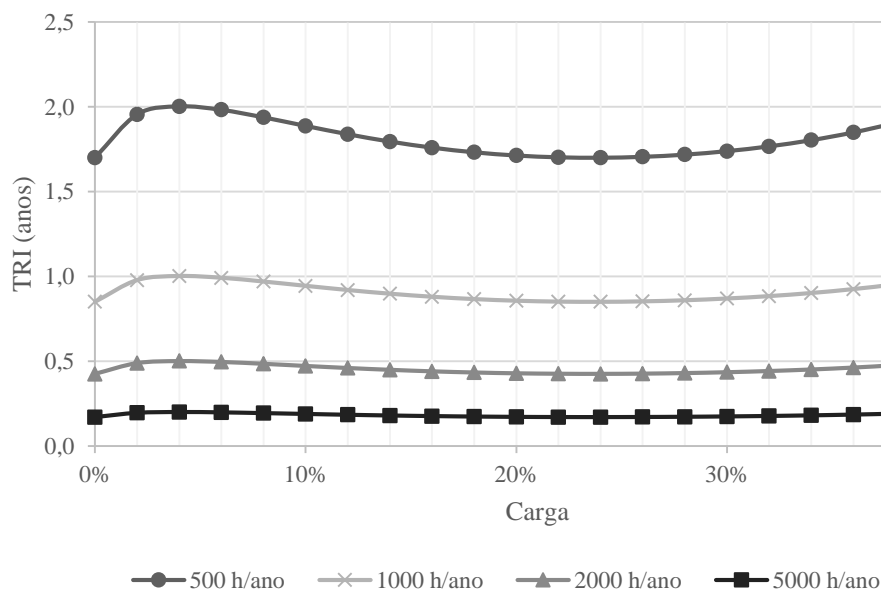


Figura 5.17 – Tempo de retorno do investimento adicional em função do nível de carga para um motor de 7,5 kW de classe IE2, numa instalação alimentada à BTE, para diferentes tempos de operação em carga baixa (em horas/ano).

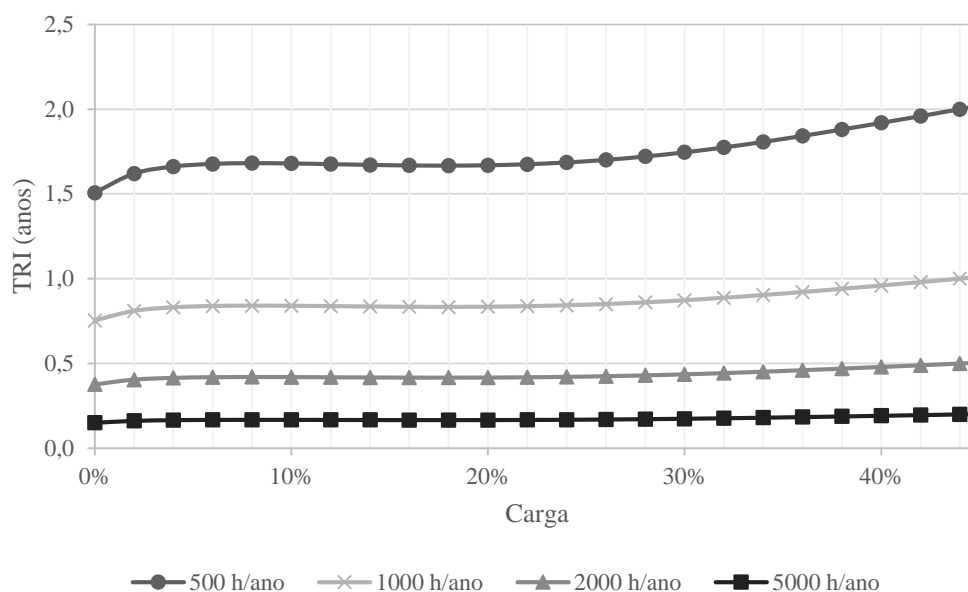


Figura 5.18 – Tempo de retorno do investimento adicional em função do nível de carga para um motor de 7,5 kW de classe IE3, numa instalação alimentada à BTE, para diferentes tempos de operação em carga baixa (em horas/ano).

Como apresentado no Capítulo 3 e comprovado através de simulações no Capítulo 4 e testes laboratoriais no Capítulo 5, com alteração tipo de ligação dos enrolamentos estatóricos dos MITGs de triângulo para estrela em períodos de carga baixa consegue-se um aumento do fator de potência.

Um mau fator de potência traduz-se num aumento do consumo de energia reativa (energia que não produz “trabalho”) e em Portugal é fortemente penalizado pelos tarifários elétricos vigentes (Tabela 5.6). Assim os consumidores finais tendem a fazer a correção/compensação do fator de potência indutivo instalando bancos de condensadores na entrada elétrica da instalação (compensação global).

Para efeitos de estudo do TRI considerar-se-á apenas um motor com carga variável. Assim assume-se que se dimensiona o banco de condensadores para a potência média reativa consumida pelo MITG (equação (5.8)), sabendo-se no entanto que existe um erro associado, isto porque, o fator de potência não varia linearmente com a carga. No caso concreto do motor de 4 kW com a ligação triângulo obtém-se uma potência reativa de  $Q_{\text{médio}\Delta} = 3163.5 \text{ var}$  e com a alteração automática do tipo de ligação dos enrolamentos estatóricos do MITG em função do nível de carga obtém-se uma potência reativa de  $Q_{\text{médioY-}\Delta} = 2323 \text{ var}$ .

$$Q_{\text{médio}} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n Q(k) \quad (5.8)$$

Entre estes dois valores existe uma relação de  $r = 73,43\%$  (motor de 4 kW, classe IE2), de  $r = 76,6\%$  (motor de 7,5 kW, classe IE2) e de  $r = 75,84\%$  (motor de 7,5 kW, classe IE3), obtida a partir da equação (5.9).

$$r = \frac{Q_{\text{médio}_{Y-\Delta}}}{Q_{\text{médio}_{\Delta}}} \quad (5.9)$$

Como referido anteriormente o fator de carga médio dos MITGs na Europa é de cerca de 60%. Depreende-se então que, durante um ciclo de trabalho, um MITG pode trabalhar a 100% da sua carga nominal, mas que grande parte do tempo desse ciclo trabalho este opera com cargas inferiores a 50%, sendo a média final igual a 60%.

O aumento do fator de potência varia com o nível de carga aplicado ao motor, sendo unitária a sua relação,  $\left(\frac{Q_{\text{médio}_{Y-\Delta}}}{Q_{\text{médio}_{\Delta}}}\right)$ , a 60% da carga nominal, isto porque, para esta percentagem de carga nominal a ligação dos enrolamentos estatóricos do MITG com a tecnologia proposta é a ligação triângulo. Deste modo, devido às variações do nível de carga que o motor está sujeito, duração deste mesmos níveis e porque a correção do fator de potência se faz para toda a instalação que contempla mais do que um motor torna-se difícil aferir quanto se pode poupar com a diminuição da potência do banco de condensadores por via do aumento do fator de potência do MITG com alteração automática do tipo de ligação dos seus enrolamentos estatóricos em função do nível de carga. Todavia, neste caso, está-se a fazer o estudo de um só motor mas não se contempla nenhum diagrama de carga específico, assume-se então o fator de carga médio dos MITGs na Europa (60%). No caso dos motores em estudo, a potência reativa consumida a 60% da carga nominal é igual a 3137 var no caso motor IE2 de 4 kW, a 4216 var no caso motor IE2 de 7,5 kW e a 4417 var no caso do motor IE3 de 7,5 kW. Assumindo-se que a correção do fator de potência seria dimensionada para estes valores médios e sabendo-se a relação entre potência reativa consumida com alteração automática do tipo de ligação dos enrolamentos estatóricos do MITG em função do nível de carga e a potência reativa consumida com a ligação em triângulo, multiplicando-se os valores da potência reativa consumida pelo motor a 60% da carga nominal (3137 var, 4216 var e 4417 var) pelas relações respetivas, calculadas anteriormente (73,43%, 76,6% e 75,84%) obtém-se uma nova potência reativa para 60% da carga nominal,  $Q_{Y-\Delta}(60\%)$ , (equação (5.10)).

$$Q_{Y-\Delta}(60\%) = Q_{\Delta}(60\%) \cdot r \quad (5.10)$$

A diferença entre o  $Q_{\Delta}$  (60%) e  $Q_{Y-\Delta}$  (60%), para o motor IE2 de 4 kW, é de 833,3 var o que se assume ser a redução na energia reativa consumida por via da instalação do dispositivo proposto no MITG e consequente alteração automática do tipo de ligação dos seus enrolamentos estatóricos em função do nível de carga.

Assim, admitindo-se um custo de 25 €/kvar para fazer compensação do fator de potência indutivo, apresenta-se na Figura 5.19 o tempo de retorno do investimento para o motor de 4 kW, classe IE2 instalado numa instalação alimentada à MT e tendo-se como pressupostos o custo do dispositivo (300 €), o custo dos contactores (60 €) e a diminuição do custo da compensação do fator de potência (20,8 €).

Repetindo os cálculos anteriores obtém-se uma diferença entre o  $Q_{\Delta}$  (60%) e o  $Q_{Y-\Delta}$  (60%) de 940 var para o motor 7,5 kW, classe IE2, apresentando-se na Figura 5.20 o tempo de retorno do investimento assumindo-se que este motor está instalado numa instalação alimentada à MT e tendo-se como pressupostos o custo do dispositivo (300 €), o custo dos contactores (90 €) e a diminuição do custo da compensação do fator de potência (23,5 €).

Na Figura 5.21 apresenta a TRI agora para o motor 7,5 kW, classe IE3 instalado numa instalação alimentada à MT e tendo-se como pressupostos o custo do dispositivo (300 €), o custo dos contactores (90 €) e a diminuição do custo da compensação do fator de potência (25,76 €) isto porque a diferença entre o  $Q_{\Delta}$  (60%) e o  $Q_{Y-\Delta}$  (60%) para este motor é de 1030,4 var.

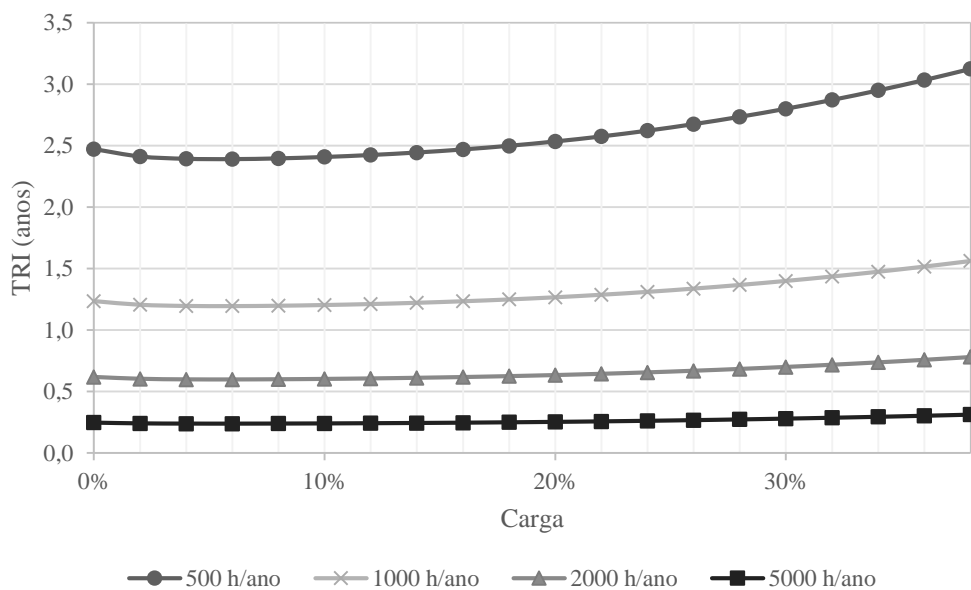


Figura 5.19 – Tempo de retorno do investimento para um motor de 4 kW, IE2 instalado numa instalação alimentada à MT por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa, tendo em conta uma diminuição do custo com compensação de fator de potência

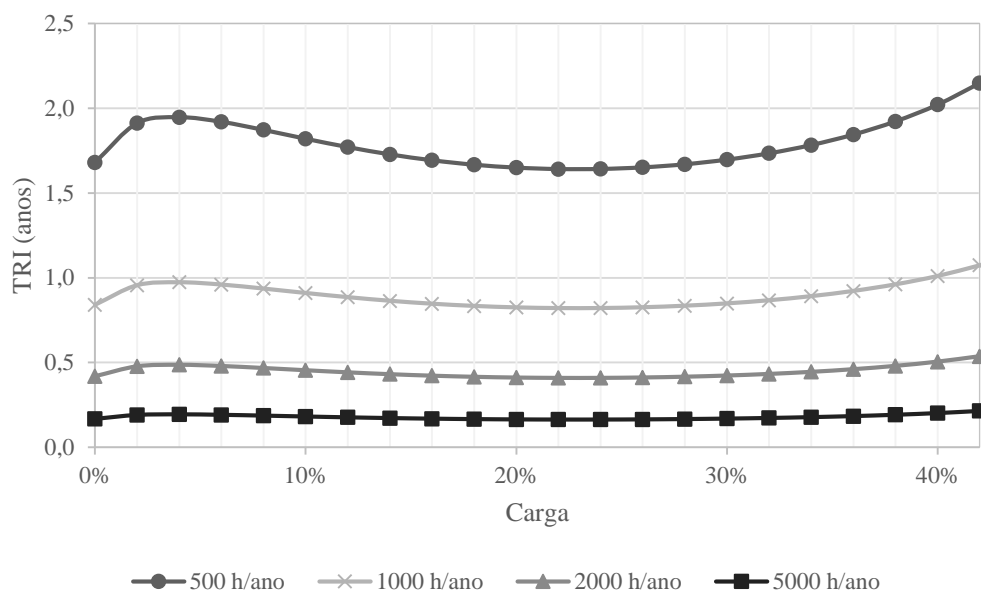


Figura 5.20 – Tempo de retorno do investimento para um motor de 7,5 kW, IE2 instalado numa instalação alimentada à MT por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa, tendo em conta uma diminuição do custo com compensação de fator de potência



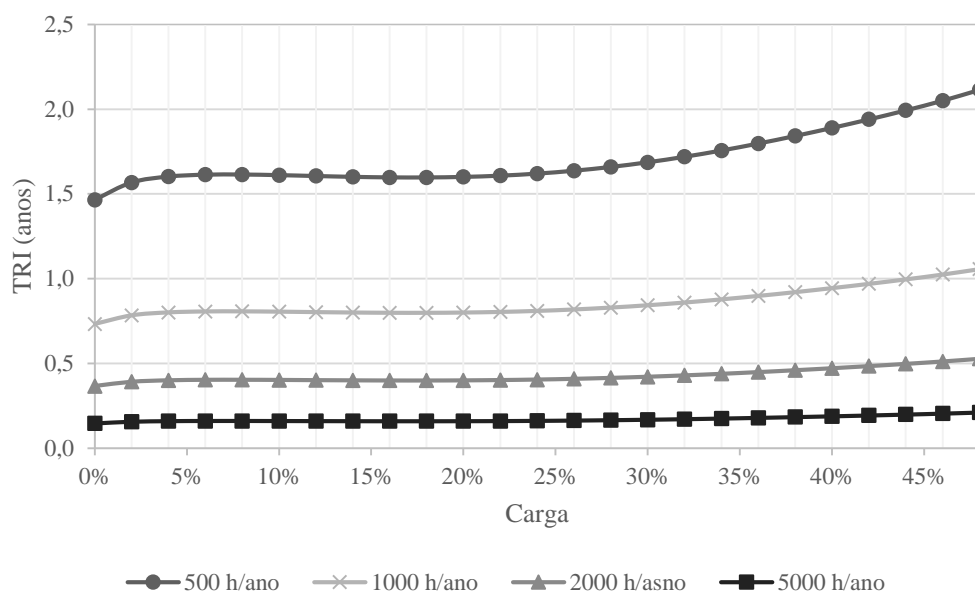


Figura 5.21 – Tempo de retorno do investimento para um motor de 7,5 kW, IE3 instalado numa instalação alimentada à MT por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa, tendo em conta uma diminuição do custo com compensação de fator de potência

Partindo-se dos pressupostos anteriores e admitindo agora que os motores se encontram instalados numa instalação alimentada à BTE apresenta-se o tempo de retorno do investimento na Figura 5.22 para o motor de 4 kW, na Figura 5.23 para o motor de 7,5 kW, classe IE2 e na Figura 5.24 para o motor 7,5 kW, classe IE3.

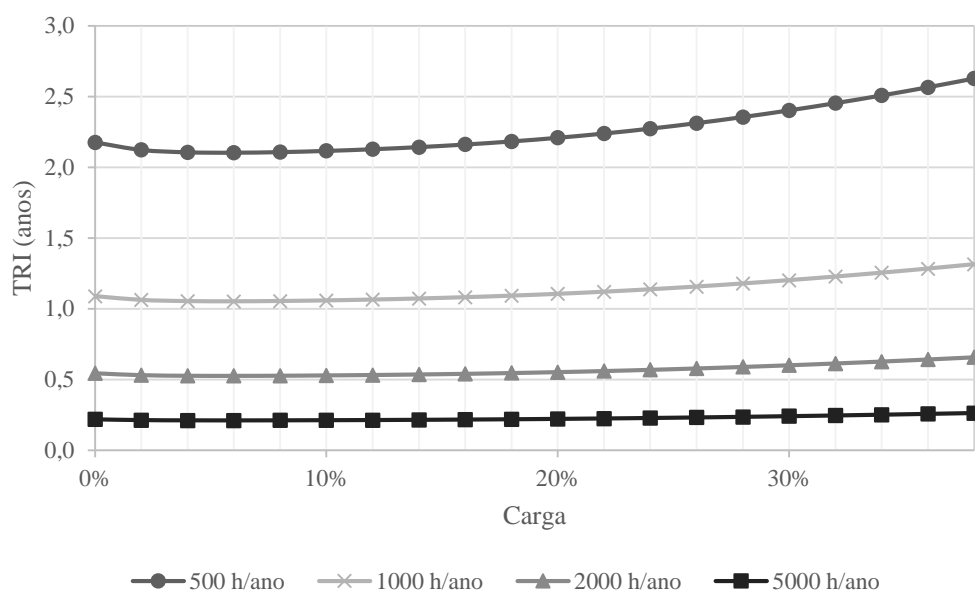


Figura 5.22 – Tempo de retorno do investimento para um motor de 4 kW, IE2 instalado numa instalação alimentada à BTE por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa, tendo em conta uma diminuição do custo com compensação de fator de potência

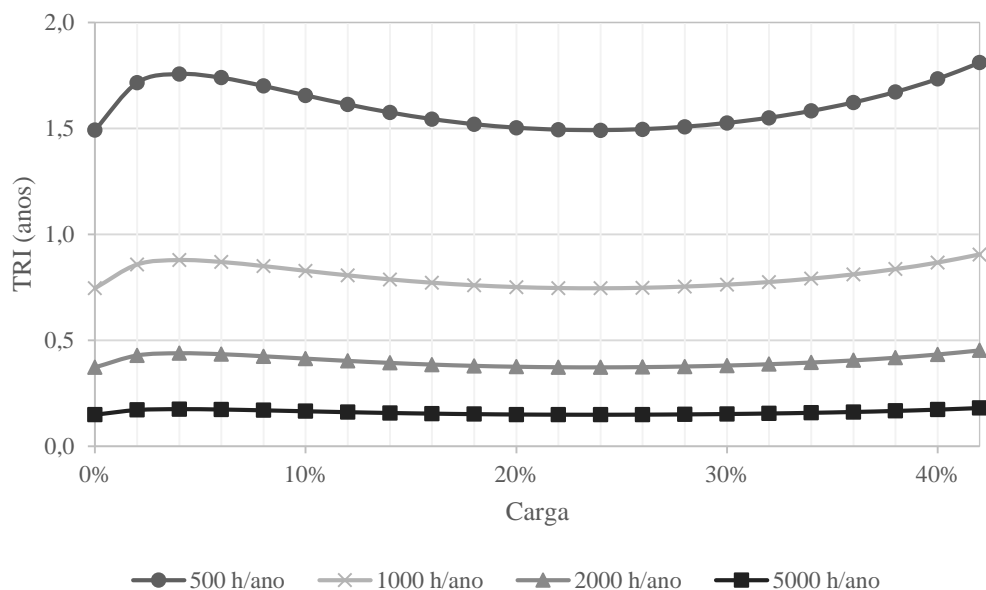


Figura 5.23– Tempo de retorno do investimento para um motor de 7,5 kW, IE2 instalado numa instalação alimentada à BTE por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa, tendo em conta uma diminuição do custo com compensação de fator de potência

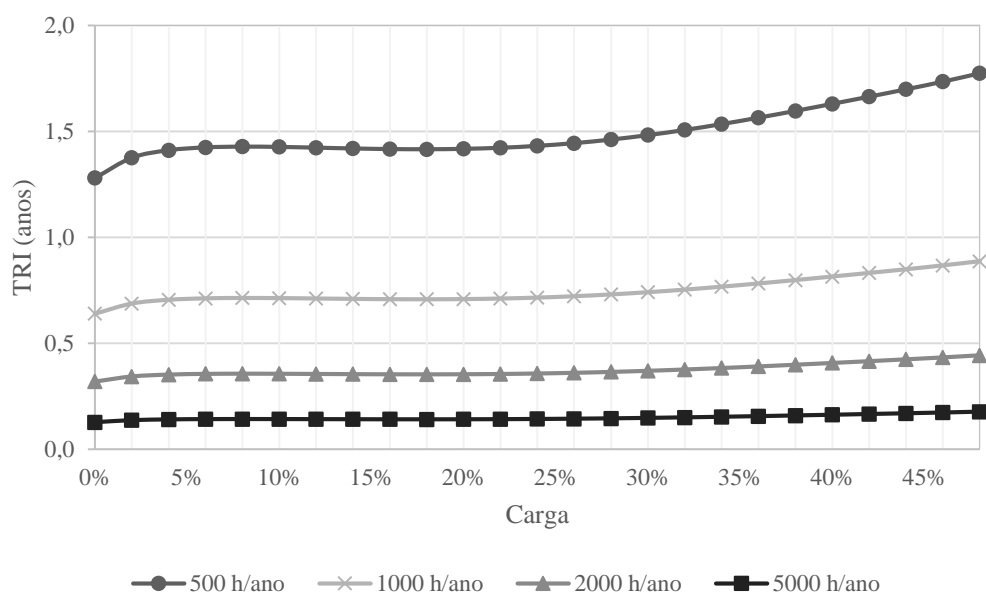


Figura 5.24 – Tempo de retorno do investimento para um motor de 7,5 kW, IE3 instalado numa instalação alimentada à BTE por número de horas de funcionamento anuais em carga baixa, tendo em conta uma diminuição do custo com compensação de fator de potência

Mais uma vez se observa que no caso de os motores estarem instalados em instalações alimentadas à BTE o *payback* é inferior ao dos motores instalados em instalações alimentadas à MT. Relativamente ao facto de se considerar uma redução da potência do banco de condensadores que fazem a correção do fator de potência indutivo por via de um aumento

deste último através da alteração automática do tipo de ligação dos enrolamentos estatóricos em função do nível de carga, como seria de esperar, tal facto leva a uma redução *payback* uma vez que a potência do banco de condensadores está diretamente relacionada com o custo deste. A redução do custo do banco de condensadores pode parecer ser um pormenor pouco significativo porém e como se demonstra na Figura 5.25. para instalações alimentadas à MT e na Figura 5.26 para instalações alimentadas à BTE esta redução pode significar uma redução de ¼ de ano no *payback* final do dispositivo sem se verificar um aumento do consumo de energia reativa.

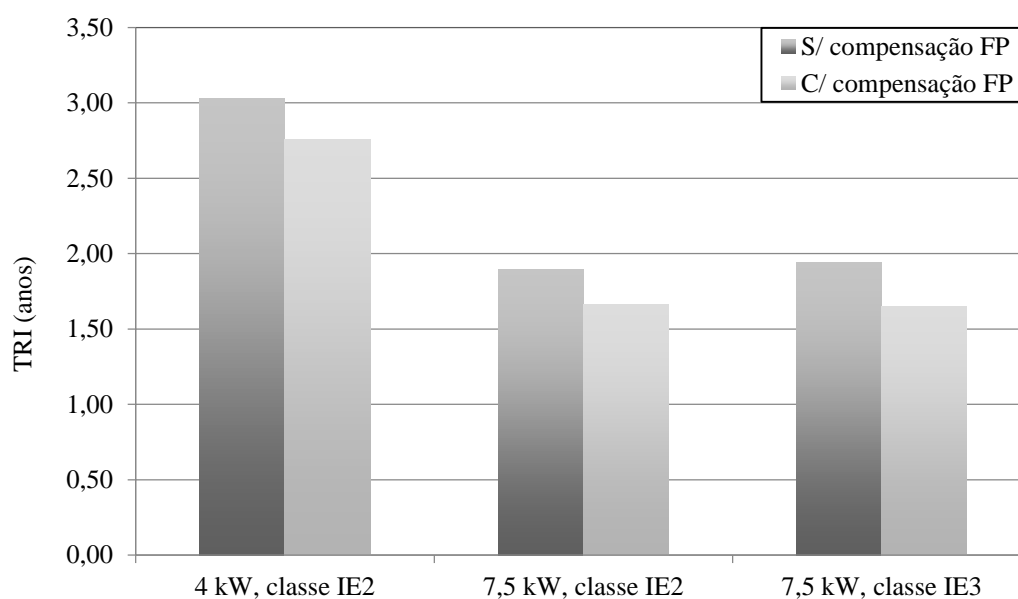


Figura 5.25 – Comparação TRI considerando ou não considerando uma redução do custo da compensação do fator de potência por via da redução do consumo de energia reativa do MITG instalado numa instalação alimentada à MT.

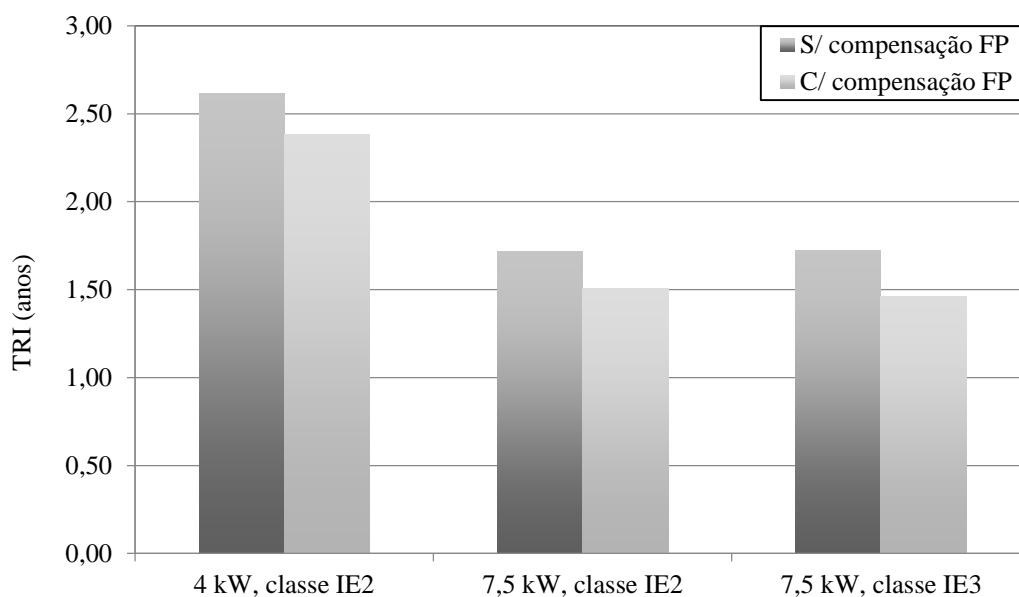


Figura 5.26 – Comparação TRI considerando ou não considerando uma redução do custo da compensação do fator de potência por via da redução do consumo de energia reativa do MITG instalado numa instalação alimentada à BTE.

Importa ainda referir que na maioria das instalações teria ainda de se considerar um filtro de harmónicos, isto porque, estes contribuem de forma significativa para a degradação do tempo de vida dos bancos de condensadores.

A tecnologia proposta apesar de não fazer correção de fator de potência da instalação permite melhorá-lo através de uma redução da potência reativa consumida pelo MITG, contribuindo assim para uma melhoria do fator de potência da instalação. De salientar ainda que cada instalação é um caso particular que deve ser estudado com cuidado por forma a que em certos períodos não pague consumo de energia reativa capacitiva. Nos casos em que o banco de condensadores seja constituído com vários *steps*, contemplando a utilização desta tecnologia para um melhor dimensionamento de cada *step* a instalação pode mesmo deixar de pagar energia reativa.

Em suma, pelo que foi demonstrado a integração desta tecnologia revela-se muito interessante também no que trata a melhorias do fator de potência da instalação, pelo que, tendo em conta todas as poupanças apresentadas, em alguns casos concretos, esta tecnologia pode apresentar uma TRI virtualmente nula comparativamente com as tecnologias presentes no mercado em novas instalações.

## Capítulo 6

### ESTUDO DE MERCADO

#### 6.1 CONCORRÊNCIA

No mercado existem atualmente três tecnologias/soluções que podem ser consideradas concorrentes do dispositivo proposto, nomeadamente, os contactores eletromecânicos, os *soft-starters* e o *SinuMEC*.

Os contactores eletromecânicos e os *soft-starters* são produtos tecnologicamente muito maduros, que têm como principal objetivo a suavização do arranque dos motores.

##### 6.1.1 Contactores eletromecânicos

Os arrancadores eletromecânicos estrela-triângulo (com três contactores) têm como desvantagem o uso de seis cabos de potência do quadro elétrico ao motor, o que se torna cada vez mais dispendioso com o constante aumento do preço do cobre. Para além disso, têm um desgaste relativamente rápido dos contactos elétricos e partes móveis. Atualmente, o deficiente contacto entre os terminais de uma fase nos contactores trifásicos constitui uma causa de avaria dos motores de indução trifásicos. O seu mercado é apresentado na Figura 6.1.

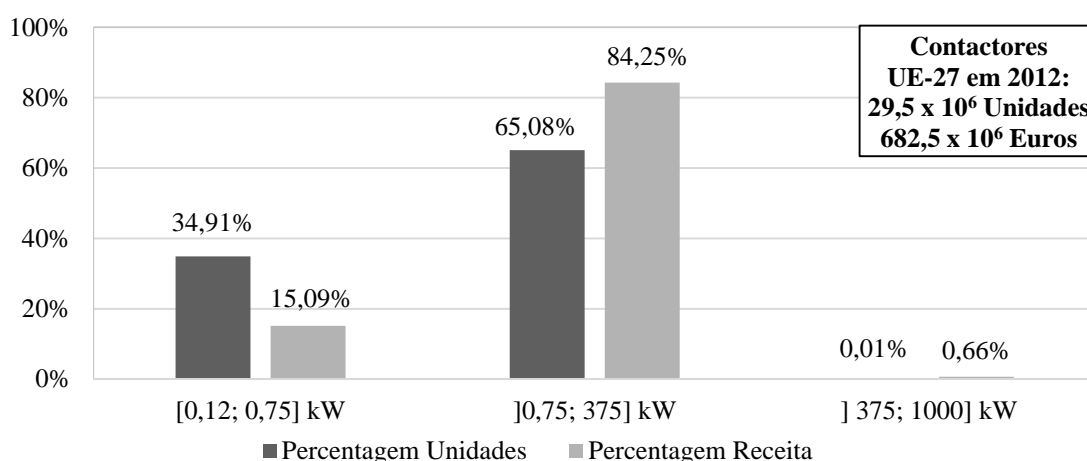


Figura 6.1 – Estimativa do mercado dos arrancadores eletromecânicos na UE-27 em 2012 [14].

##### 6.1.2 Arrancador eletrónico

Os *soft-starters* mais modernos, para além de serem totalmente eletrónicos (tecnologia de estado sólido), oferecem ainda um conjunto de funcionalidades de proteção do motor e portas de comunicação (p. ex. *Profibus*, *DeviceNet*, *CAN*, outras). Porém, os *soft-starters*, para além de serem mais dispendiosos que os contactores, produzem harmónicos de corrente e tensão à

entrada (rede) e à saída (motor), que se traduzem em perdas adicionais e degradação do fator de potência na rede elétrica e no motor. O seu mercado, apesar de mais pequeno que o dos contactores, é também considerável (Figura 6.2).

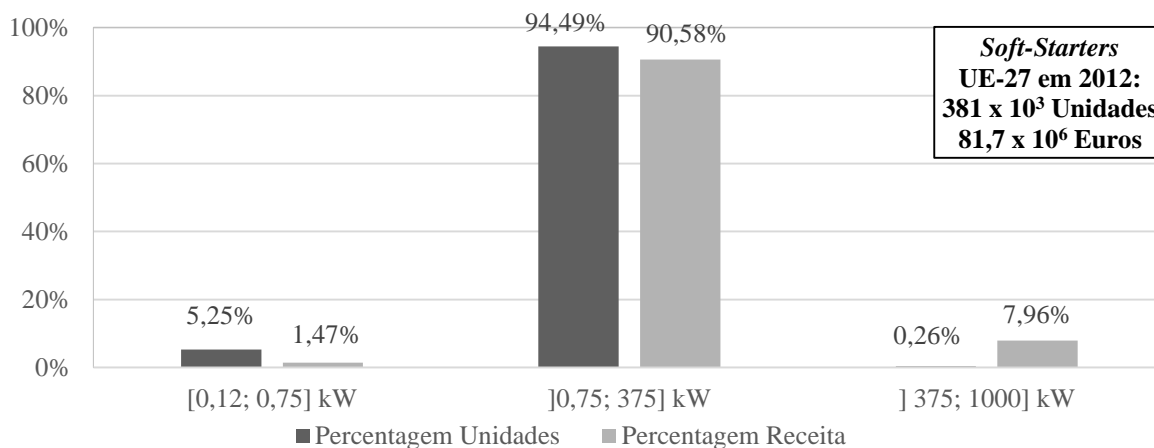


Figura 6.2 – Estimativa do mercado dos *soft-starters* na UE-27 em 2012 [14].

### 6.1.3 SinuMEC

O *SinuMEC* é uma tecnologia alternativa no mercado que, ao contrário das anteriores, para além do arranque suave, permite ainda poupar energia em regime permanente através da regulação da amplitude da tensão aos terminais do motor. Todavia, para além de ser um equipamento volumoso e pesado, o seu preço é mais elevado que as tecnologias apresentadas.

## 6.2 DIMENSÃO DO MERCADO

A nível mundial estima-se que estejam instalados cerca de 2,23 mil milhões de motores elétricos. Os motores pequenos, abaixo de 0,75 kW, representam cerca de 90% da população mas usam apenas 9% do total da energia elétrica consumida pelos motores elétricos. Há cerca de 230 milhões de motores de média potência, entre 0,75 e 375 kW, que são responsáveis por cerca de 68% da eletricidade consumida pelos motores, representando a gama de potência mais relevante em termos de consumo energético, e onde existe o maior potencial de poupança de energia. Os motores de grande porte, com potência acima dos 375 kW, são aproximadamente 600 mil, sendo responsáveis por 23% do consumo da força motriz.

Na Figura 6.3, evidencia-se a relevância da gama entre 0,75-375 kW em termos de número de unidades vendidas e de receita.

O dispositivo proposto é vocacionado para os motores na gama de potência média/baixa, entre 4 e 30 kW, na qual se verifica simultaneamente um baixo fator de carga e um elevado consumo

de energia. Há assim um elevado potencial de poupança energética associado à utilização da solução proposta e um mercado potencial de grande dimensão para aplicações existentes (*retrofitting*). Para além disso, o potencial mercado europeu anual para a tecnologia proposta, noutras aplicações, é muito significativo.

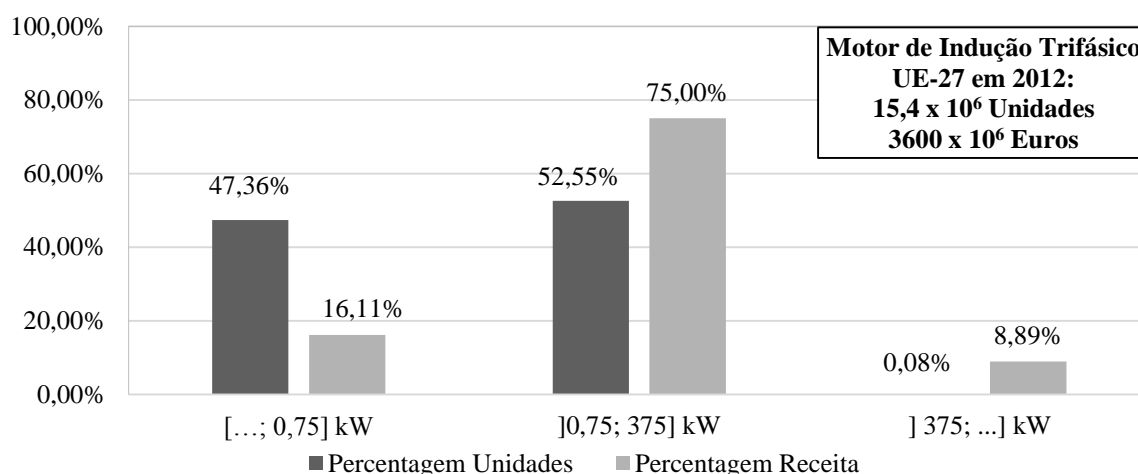


Figura 6.3 – Estimativa do número de motores de indução trifásicos vendidos na UE-27 em 2010 [14].

No mercado europeu (União Europeia dos 27, UE-27) no ano de 2012, na gama de 0,75 a 375 kW, foram vendidos 2,87 milhões de unidades de variadores eletrónicos de velocidade (VEV) a um preço médio de 870 € (Tabela 6.1, Figura 6.2). Na mesma gama de potência foram vendidos 360.000 *soft-starters*, por um preço médio de 206 € e 19.2 milhões de contactores (arrancadores eletromecânicos) a um preço médio de 30 €, conforme se pode observar na Tabela 6.1 e Figura 6.1.

Em aplicações de carga variável e velocidade constante o VEV não é a melhor solução para se obter poupanças em regime permanente, como vimos anteriormente, porém esta é uma solução para fazer arranques suaves dos MITG (apesar de muito cara comparativamente com as anteriormente apresentadas). A utilização deste solução justifica-se em situações onde existe uma clara necessidade de variar a velocidade do MITG ou em casos onde por meio da variação da velocidade se consigam poupanças. Assim na Figura 6.4 apresenta-se o mercado dos VEVs na EU-27.

Tabela 6.1 – Número de VEVs, *Soft-Starters* e Arrancadores Eletromecânicos vendidos (milhares) e receita (milhões €) por gama de potência (EU-27,2012) [14].

	Gama de Potência					
	]0,12; 0,75] kW		]0,75; 375] kW		]375; 1000] kW	
	Nº Unidades	Receita	Nº Unidades	Receita	Nº Unidades	Receita
VEV	1130	200	2870	2 500	7	260
<i>Soft-Starters</i>	20	1,2	360	7,4	1	6,5
Contactores	10 300	103	19 200	575	3	4,5

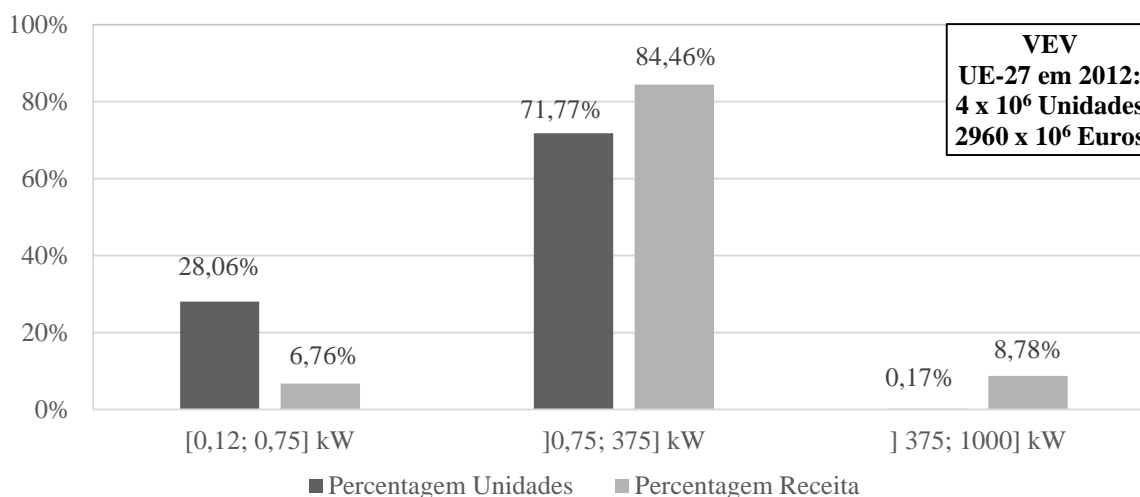


Figura 6.4 – Estimativa do mercado dos VEVs na UE-27 em 2012 [14].

### 6.3 DISPOSITIVO PROPOSTO vs. CONCORRÊNCIA

A tecnologia apresentada reúne todas as vantagens e não tem nenhuma das desvantagens referidas para as soluções anteriores (concorrentes). Em relação aos contactores é uma solução mais barata, compacta, fiável e eficiente, permitindo transições estrela-triângulo e triângulo-estrela muito mais suaves. Em relação aos *soft-starters*, para além de também permitir realizar arranques suaves, de ser totalmente eletrónico (tecnologia de estado sólido) e de reunir um conjunto de funcionalidades de proteção do motor e de comunicação com outros equipamentos e computadores, é mais barato, mais compacto, não produz harmónicos e pode oferecer funcionalidades mais avançadas como seja o diagnóstico de avarias, baseado na fusão do conteúdo espectral da corrente e das vibrações mecânicas do motor.

Em relação ao *SinuMec*, o dispositivo proposto é muito mais barato, mais compacto e permite, igualmente, realizar arranques suaves e melhorar o rendimento e o fator de potência em regime permanente (tecnologia sinusoidal) dos motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo, com carga variável. Para além disso, oferece as funcionalidades de diagnóstico de avarias avançado, não disponíveis no *SinuMec*.



A tecnologia proposta, ao contrário de todas as soluções referidas, devido ao seu reduzido volume, pode ser instalado na caixa de terminais do motor, não ocupando espaço no quadro elétrico, sendo esta, uma das suas várias características diferenciadoras.

Na Tabela 6.2, apresenta-se uma comparação entre o dispositivo proposto e os dispositivos concorrentes apresentados anteriormente.

Tabela 6.2 – Comparação entre o dispositivo proposto e os dispositivos concorrentes no mercado

	Dispositivo	Contactores	Soft Starter *	SinuMec
Redução do consumo em regime permanente	☺ ☺	☹	☹ ☹	☺ ☺ ☺
Melhoramento do FP	☺ ☺ ☺	☹	☹ ☹	☺ ☺ ☺
Proteção do motor	☺ ☺	☺	☺ ☺	☺ ☺
Comunicação redes industriais	☺	N.A.	☹	☹
Número de condutores de potência	☺ ☺ ☺	☹	☺ ☺ ☺	☺ ☺ ☺
Espeço ocupado no quadro	☺ ☺ ☺	☹	☹	☹ ☹
Fiabilidade do sistema	☺ ☺ ☺	☹	☺ ☺	☺ ☺
Consumo do próprio dispositivo	☺	☺	☺	☺
Diagnóstico de avarias	☺ ☺ ☺	N.A.	N.A.	N.A.
Preço	☺ ☺ ☺	☺ ☺	☺	☹ ☹

\* Elegível apenas e só no arranque

Das três tecnologias referidas, os contactores eletromecânicos são, de longe, os mais utilizados (Figura 6.5), sendo que as suas vendas (número de unidades vendidas) se têm crescido ao longo da última década (Figura 6.6).

Interessa reforçar que a tecnologia proposta não é comparável aos variadores eletrónicos de velocidade (VEVs), uma vez que não tem por objetivo variar a velocidade dos motores, mas sim regular o seu binário, com velocidade fixa.

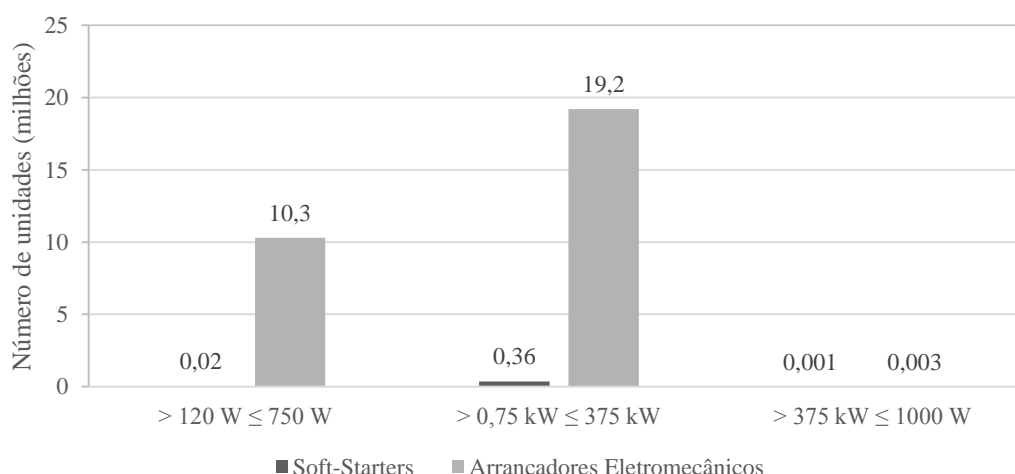


Figura 6.5 – Mercado dos arrancadores suaves (EU-27, 2012) [11, 14]

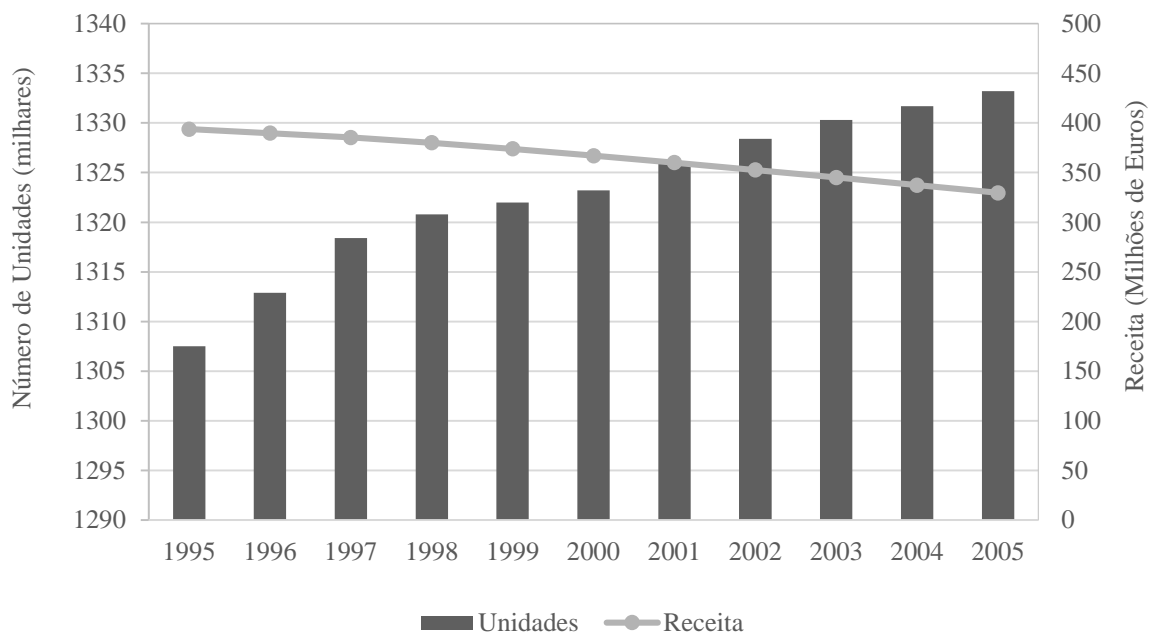


Figura 6.6 – Mercado dos arrancadores estrela-triângulo, segundo um fabricante [37]

Na Figura 6.7, na Figura 6.8, na Figura 6.9 e na Figura 6.10 apresenta-se o posicionamento do dispositivo proposto em relação às soluções concorrentes no mercado para a realização de arranques suaves e para regulação do fluxo de magnetização, em função da carga real do motor, em regime permanente.

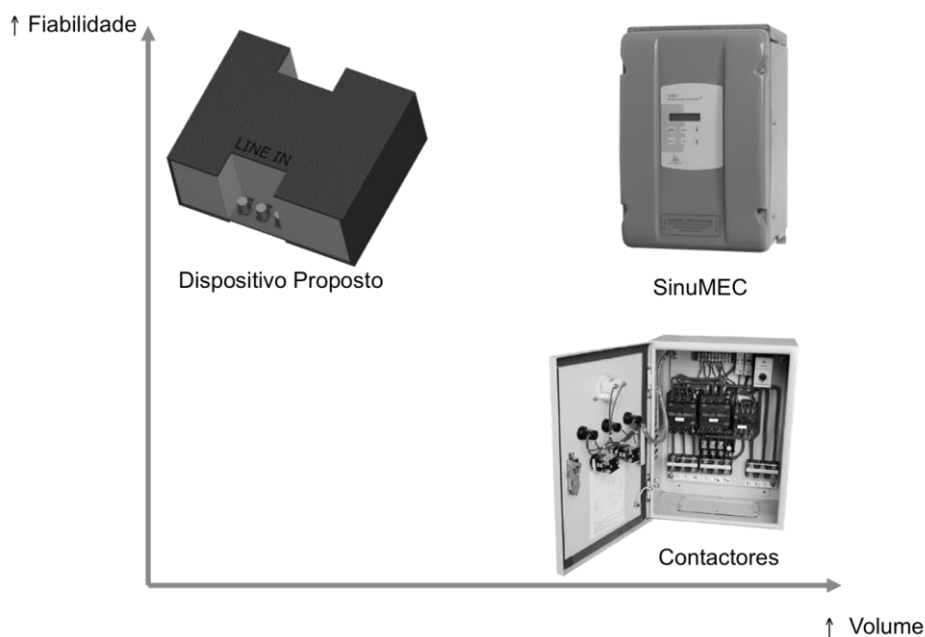


Figura 6.7 – Posicionamento (volume) do dispositivo proposto em relação a outras tecnologias para regulação de fluxo em regime permanente de MITG (assumindo que se usa um controlador eletrónico para os contactores Y/D).

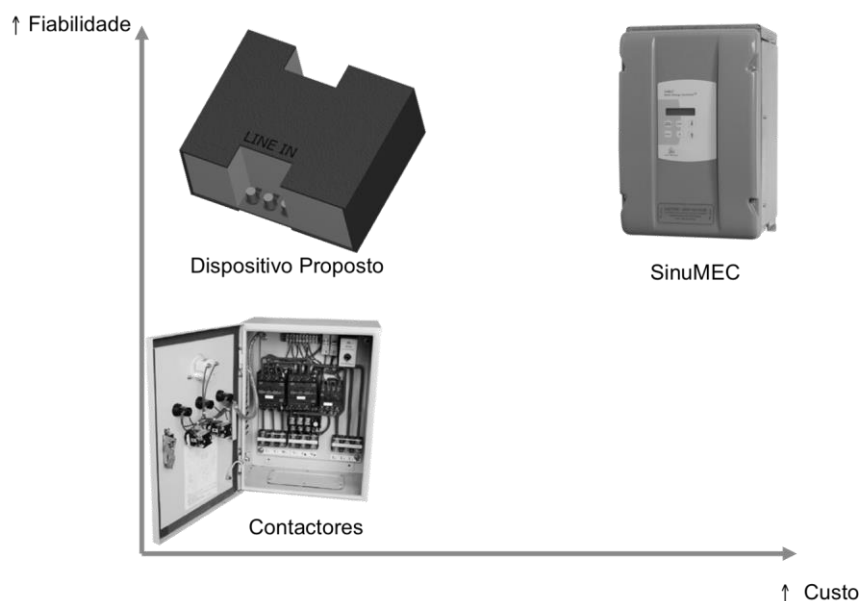


Figura 6.8 – Posicionamento (custo) do dispositivo proposto em relação a outras tecnologias para regulação de fluxo em regime permanente de MITG (assumindo que se usa um controlador eletrónico para os contactores Y/D).

Como referido anteriormente, os contactores eletromecânicos são atualmente a tecnologia mais utilizada para fazer arranques suaves de motores de indução trifásicos mas não permitem poupar energia nos motores em regime permanente/estacionário. Se a isto se juntar o facto de ser necessário espaço dedicado no quadro elétrico, de serem dispositivos eletromecânicos com desgaste dos contactos elétricos e de todas as peças móveis (conduzindo a um tempo de vida mais limitado) e de serem necessários 6 condutores para alimentar o motor, no caso de um sistema de arranque estrela-triângulo, ao invés de três condutores utilizados com o dispositivo proposto, são por si só, razões para que o cliente escolha a tecnologia proposta, sem mencionar as poupanças energéticas que o dispositivo permite, que são também uma importante vantagem.

Nos dias de hoje a fiabilidade é um ponto muito importante para a indústria, diria mesmo mais importante que o aumento da eficiência. Os contactores apesar de muito fiáveis são responsáveis por uma causa comum de avaria dos MITGs (falta de fase). O dispositivo proposto apresenta um sistema eletrónico que em situação de falta de fase desliga o motor aumentando assim a fiabilidade do sistema. De realçar ainda que a solução proposta é constituída por tecnologia de estado sólido que só por si apresenta uma fiabilidade superior à tecnologia dos contactores (possui parte móveis), e relativamente a esta ultima não necessita de manutenção.

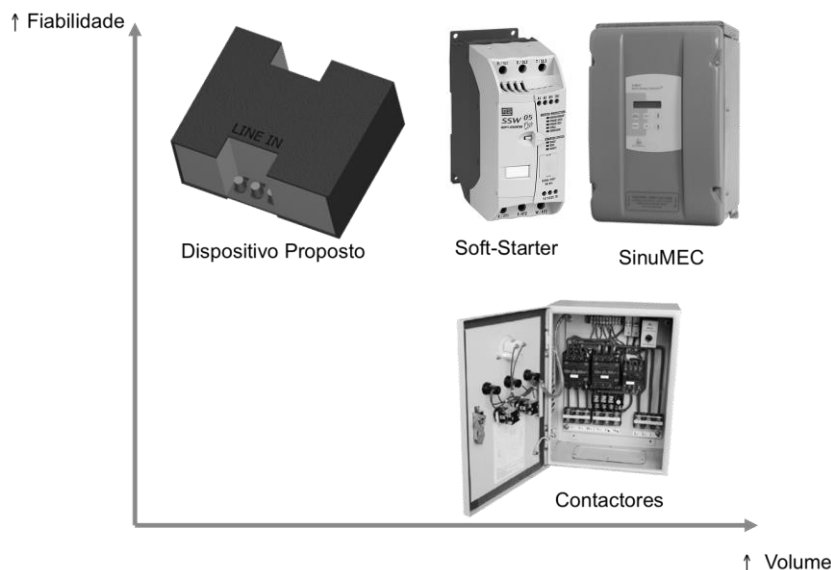


Figura 6.9 – Posicionamento (volume) do dispositivo proposto em relação a outras tecnologias para arranque suave de MITG.

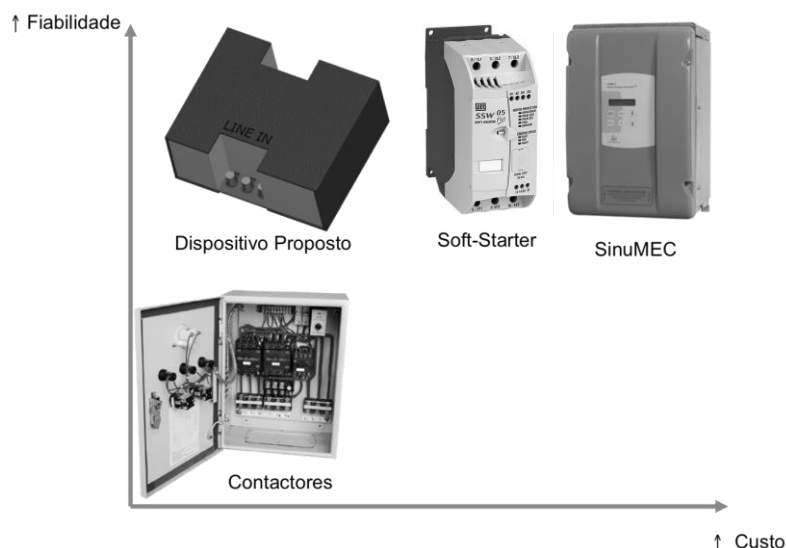


Figura 6.10 – Posicionamento (custo) do dispositivo proposto em relação a outras tecnologias para arranque suave de MITG.

O dispositivo proposto vem então permitir a maximização do rendimento de motores sobredimensionados e/ou de carga variável de uma forma inovadora e com um custo de investimento e um tempo de retorno do investimento muito reduzidos. De salientar que, para novas instalações, a utilização da tecnologia proposta, como solução alternativa aos sistemas convencionais de arranque estrela-triângulo com contactores, terá um tempo de retorno do investimento virtualmente nulo. Isto comprova-se uma vez que o seu custo é equivalente ou inferior à instalação de um sistema convencional com contactores eletromecânicos (se se

contabilizar todos os custos, incluindo a redução para metade do número de condutores, cujo custo pode ser muito relevante, caso a aplicação esteja consideravelmente distante do quadro elétrico) e, para além disso, permite obter poupanças energéticas.

Deste modo, o dispositivo proposto apresenta-se como uma excelente solução alternativa às tecnologias comercialmente disponíveis e possui ainda um grande potencial de crescimento devido às funcionalidades presentes. Mesmo sendo pensado para fazer o controlo e monitorização de motores com carga variável ele pode, sem qualquer inconveniente, ser aplicado a motores com carga fixa e permitir desta forma monitorização e controlo remoto do motor através da comunicação integrada.

#### 6.4 MERCADO POTENCIAL

Por tudo o que já foi visto até agora, no que trata ao arranque de motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo, o arranque eletromecânico (contactores) estrela-triângulo é o mais utilizado no mercado (Figura 6.5). Por permitir fazer o arranque suave, no caso o mesmo arranque dos contactores, pode-se assumir que o mercado potencial do dispositivo proposto é igual ao dos arrancadores eletromecânicos, 29,5 milhões de unidades/ano (Figura 6.1). Todavia, estar-se-ia a cometer um erro grosseiro, isto porque, o mercado apresentado engloba potências [0,12; 1000] kW e a tecnologia proposta destina-se a potências [4 – 30] kW.

Sabendo-se que existe uma relação de proporcionalidade inversa entre a potência do MITG e a sua percentagem de mercado, isto é, à medida que a potência aumenta a sua percentagem de mercado diminui (Figura 6.3), e que grande parte dos arrancadores estrela-triângulo vendidos na Europa são para a gama [0 – 100] kW (Figura 6.11), assume-se como mercado potencial 786.588 de unidades/ano [37].

Sabendo-se que existem 23 potências normalizadas para MITG dos [0 – 100] kW, e por tudo o que já foi dito anteriormente, dividindo-se o mercado apresentado (786.588 unidades/ano) pelas 23 potências normalizadas obtém-se que o número de unidades/ano vendidas por potência normalizada é de 47.995 unidades/ano. Uma vez que o dispositivo proposto estará disponível para potências [4 – 30] kW o mercado potencial é então obtido multiplicando 47.995 unidades/ano por 8 (número de potências normalizadas dos [4 – 30] kW), sendo este de 383.962 de unidades/ano.

Este mercado apresenta um erro por defeito, isto porque, para potências inferiores aos 4 kW é muito raro encontrar-se um MITG equipado com um arrancador estrela-triângulo.

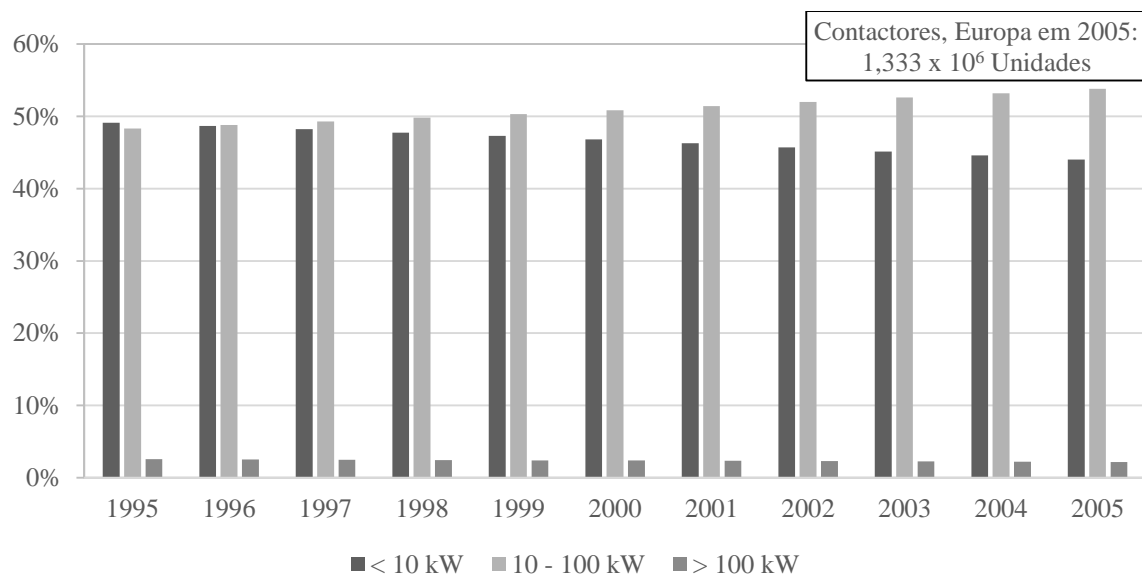


Figura 6.11 – Percentagem de arrancadores eletromecânicos (de um só fabricante) na Europa [37]

De ter em conta que o mercado de 768.588 unidades/ano é relativo a um só fabricante com uma quota de mercado em 1998 de 32,6 % para potências < 10 kW e 30,1 % para potências [10 – 100] kW (Figura 6.12, Figura 6.13). Deste modo, e uma vez que até à data ainda não existe um dispositivo semelhante no mercado, pode-se assumir que o mercado potencial de 383.962 de unidades/ano é aproximadamente três vezes maior (1,152 milhões de unidades/ano).

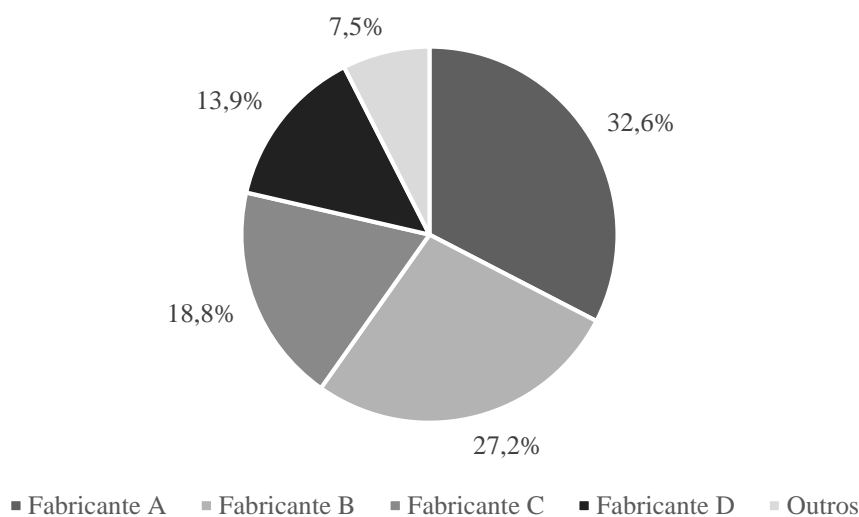


Figura 6.12 – Quota de mercado dos arrancadores estrela-triângulo (< 10 kW) por receitas na Europa em 1998 [37]

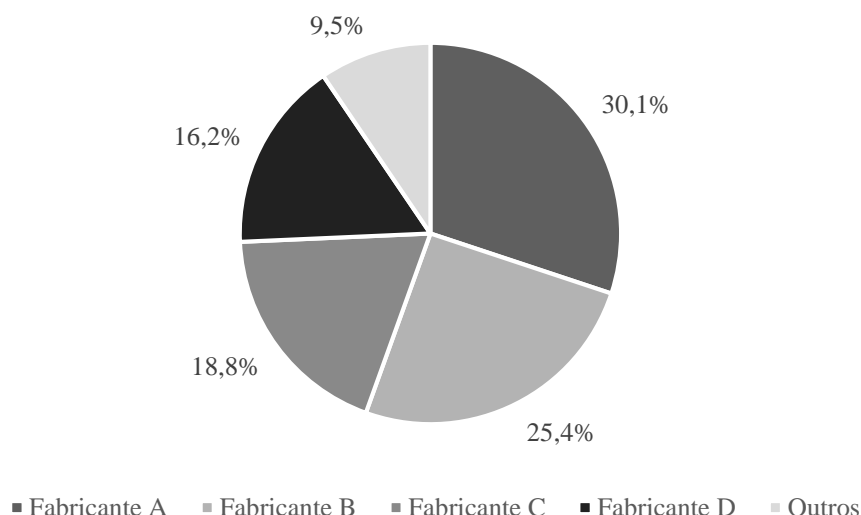


Figura 6.13 – Quota de mercado dos arrancadores estrela-triângulo (10 - 100 kW) por receitas na Europa em 1998 [37]

Interessa ainda referir que o mercado potencial apresentado mostra apenas e só o mercado de *retrofitting*. Admitindo um crescimento médio anual (CMA) de 2% ao ano [37] e a entrada do dispositivo proposto no mercado em 2015, o mercado potencial de novas aplicações é de 1,404 milhões de unidades/ano na Europa (equação (6.1)).

$$N^{\circ} \text{ de unidades}_{2015} = N^{\circ} \text{ de unidades}_{2005} \cdot (CMA + 1)^{n^{\circ} \text{ anos}} \quad (6.1)$$

Todavia, e uma vez que o dispositivo é facilmente comercializado à escala global, interessa estudar qual o mercado potencial a nível mundial.

Com intuito de quantificar o mercado potencial mundial do dispositivo e sabendo-se que os MITG são responsáveis pelo consumo de cerca 40% da energia elétrica mundial, assume-se que existe uma relação de proporcionalidade entre o consumo de energia e o número de motores elétricos (Figura 6.14).

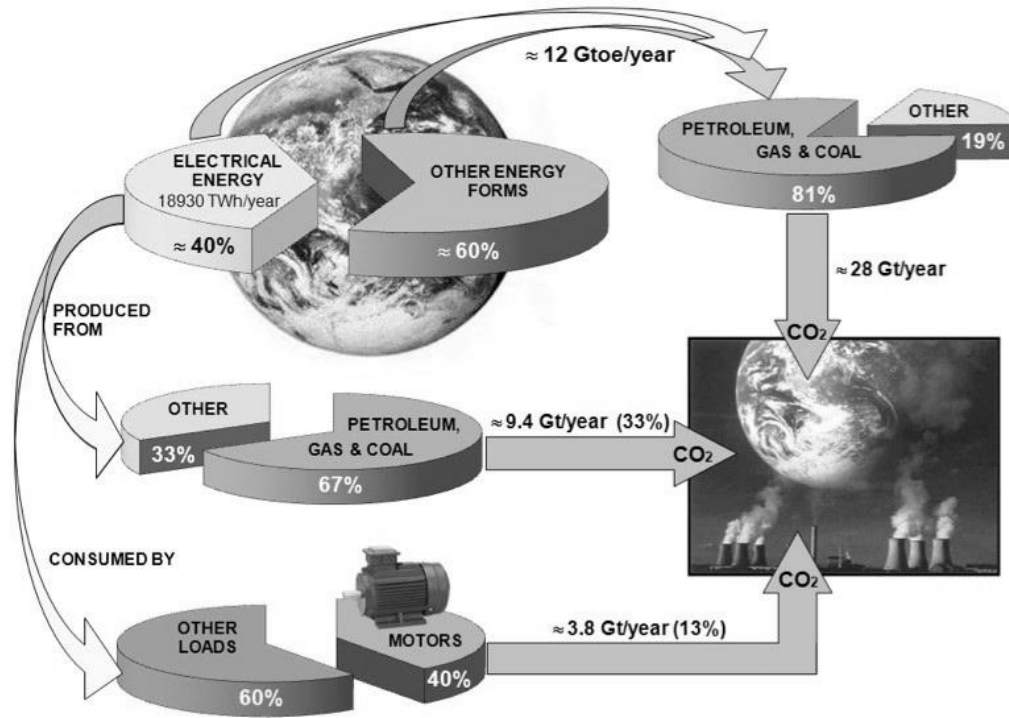


Figura 6.14 – Consumo de energia e emissões de  $\text{CO}_2$  a nível mundial em 2006 [38]

Segundo o IEA (*Internacional Energy Agency*), em 2012 na UE-28 foram consumidos 3103,18 TWh, no Brasil 498,36 TWh e no continente Africano 641,23 TWh [39].

Utilizando equação (6.2) é possível calcular o crescimento médio anual do consumo de energia elétrica para a UE-28 (1%), Brasil (3,8%) e África (4%) [39].

De ressaltar que o crescimento médio anual calculado para UE-28 não parece estar em consonância com a Figura 6.15., porém, o decréscimo no consumo de energia representado não revela (por agora) uma tendência mas sim uma pequena redução no consumo de energia elétrica (talvez devido à crise económica que a UE atravessa). De qualquer modo, o valor do crescimento médio anual calculado irá ser usado até porque este erro tem como consequência uma diminuição do mercado potencial do dispositivo proposto.

Utilizando os valores do crescimento médio anual, calculado anteriormente, é possível estimar o consumo de energia em 2015 na UE-28 (3210 TWh), Brasil (557,2 TWh) e África (722 TWh) (equação (6.3)).

$$CMA_{1995-2012} = \left( \left( \frac{\text{Consumo}_{2012}}{\text{Consumo}_{1995}} \right)^{1/n^{\text{anos}}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (6.2)$$



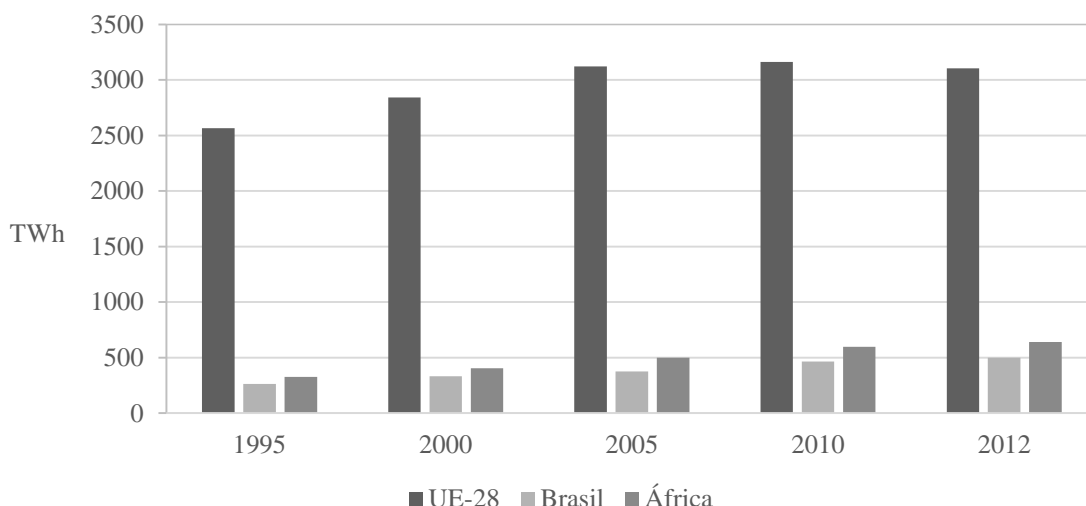


Figura 6.15 – Consumo de eletricidade na UE-28, Brasil e África [39]

$$Consumo_{2015} = Consumo_{2012} \cdot (CMA + 1)^{n^o \text{ anos}} \quad (6.3)$$

Através de uma relação de proporcionalidade direta entre o consumo de energia e o número de motores tem-se que em 2015 no Brasil o mercado potencial anual é aproximadamente de 243,710 mil de unidades/ano e em África 315,791 mil de unidades.

De ressaltar que este mercado potencial extrapolado refere-se apenas ao mercado do arranque estrela-triângulo, existindo ainda o mercado das aplicações que operam em regime permanente com carga variável e velocidade constante. Este último é muito difícil de dimensionar sabendo-se, no entanto, que será muito grande uma vez que na Europa o fator de carga médio é de 60% (Figura 1.3).

## 6.5 ESTUDO DE MERCADO

Para tomar conhecimento da aceitação do produto no mercado apostou-se na elaboração de um inquérito *online*, para o qual foram selecionadas indústrias das mais diferentes áreas desde pedreiras, serrações, cimenteiras, indústrias do setor têxtil, calçado, papel e prensagem, tendo ainda sido abordada uma empresa do ramo da distribuição de energia (Tabela 6.3). Os resultados são apresentados nas Figura 6.16, Figura 6.17 e Figura 6.18. Todas as respostas obtidas apontam para um nível de aceitação total do produto, assim como indicam a existência de motores sobredimensionados e/ou de carga variável nas suas instalações.

Tabela 6.3 – Perguntas constituintes do inquérito *online*.

Nº	Questão
1	Numa instalação o dispositivo proposto substitui os 2 contactores de comutação estrela-triângulo. Caso necessite de instalar um novo motor terá que fazer um investimento nos contactores e em 6 condutores de alimentação do motor. Ao instalar o motor com o dispositivo proposto eliminaria o investimento em 2 contactores e em 50% dos condutores de alimentação do motor. A alternativa que sugerimos parece-lhe atrativa?
2	Quantos motores existem na sua empresa sobredimensionados ou com carga variável?
3	Qual o investimento máximo que faria num dispositivo se o tempo de retorno de investimento fosse inferior a 2 anos?

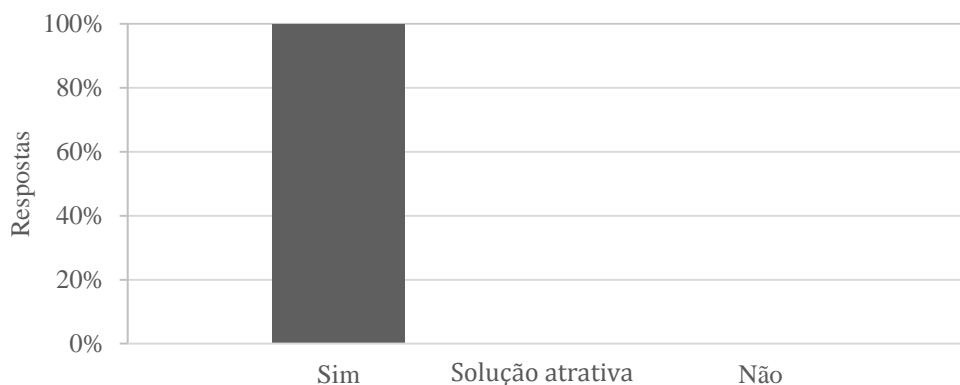


Figura 6.16 – Respostas obtidas à pergunta nº 1.

De acordo com o inquérito sabe-se ainda que o investimento máximo que qualquer das empresas estaria disposta a fazer no dispositivo, ronda o valor estipulado para a venda do dispositivo proposto.

As respostas obtidas de empresas como Cimpor, Soporcel/Portucel ou mesmo da EDP, dão uma credibilidade sustentada ao dispositivo, dada a dimensão das mesmas e do seu interesse na aplicação do dispositivo. De notar que as empresas em questão apresentam valores de motores sobredimensionados e/ou de carga variável de 40% a 60% (Cimpor), 60% a 80% (Soporcel) e 20% a 40% (EDP). As mesmas afirmam que o valor comercial do produto apresentado situa-se acima dos 300 € (Cimpor e Soporcel) e entre 200 € e 250 € (EDP).

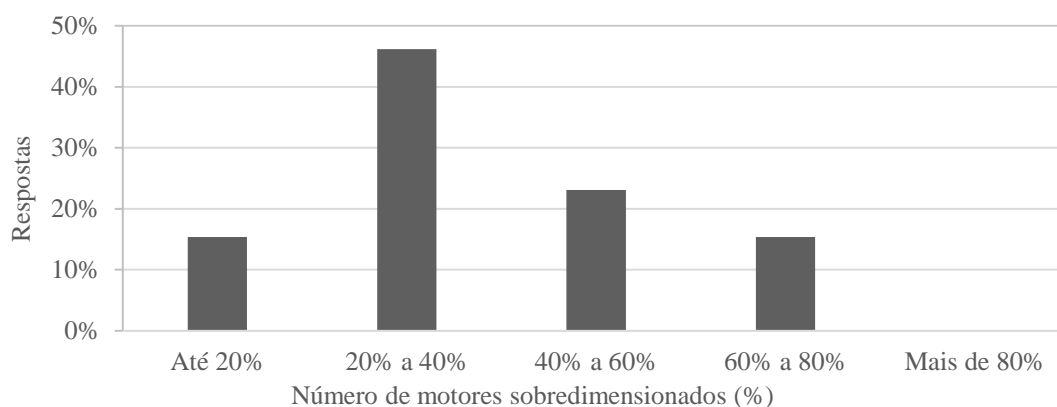


Figura 6.17 – Respostas obtidas à pergunta nº 2.

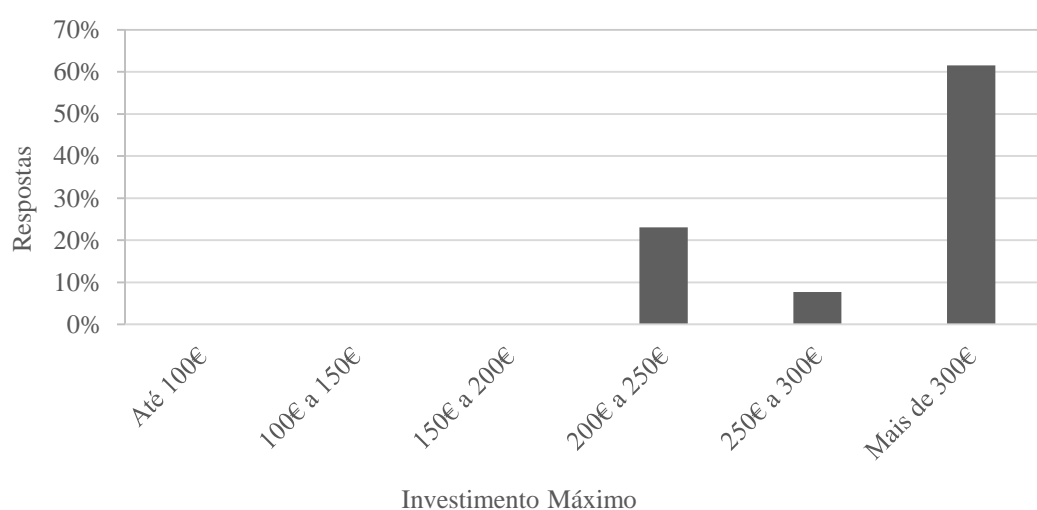


Figura 6.18 – Respostas obtidas à pergunta nº3.

Uma fatia significativa do mercado alvo opta por não investir na eficiência energética das suas máquinas devido ao elevado investimento que têm de fazer na aquisição dos equipamentos.

Com a tecnologia proposta pretende-se abrir as portas da eficiência energética aos consumidores que menos apostam neste campo ou com menor capacidade de investimento. A compra de um equipamento, com vista ao aumento da eficiência energética, tem como fator crucial o tempo de retorno do investimento (*payback*), sendo este aspeto muito favorável no dispositivo proposto (*payback* < 2 anos).



## Capítulo 7

# CONCLUSÃO

### 7.1 CONCLUSÕES

A tecnologia proposta neste trabalho de projeto é bastante compacta e eficiente, o que permite que seja instalada dentro da caixa de terminais dos MITGs. Assim o dispositivo proposto apresenta como principais vantagens a redução do número de condutores utilizados para fazer o arranque estrela-triângulo o convencional, por ser uma tecnologia de estado sólido não tem manutenção, apresenta uma fiabilidade muito elevada e um tempo de vida útil também ele elevado. O facto de permitir aumentar o desempenho dos MITGs leva a uma da redução das perdas em toda a instalação e do transformador de alimentação. Em casos particulares pode ainda levar a uma redução do banco de condensadores utilizado para fazer a compensação do fator de potência. Como principais desvantagens temos a reduzida gama de potências dos MITGs na qual se pode instalar o dispositivo, o facto de a caixa de terminais ter de ter uma medida mínima para que o dispositivo possa ser instalado e o consumo associado ao dispositivo, apesar de este ser muito reduzido.

Em Portugal, com exceção de alguns componentes eletrónicos discretos e dos circuitos integrados, há competência tecnológica e industrial para a sua produção integral. O funcionamento do dispositivo proposto está experimentalmente comprovado por meio da construção e teste de protótipos funcionais e realização de medidas, que demonstram, sem qualquer dúvida, a redução da potência/energia ativa e o melhoramento do fator de potência dos motores controlados.

O consumo de energia em todas as suas formas é um problema atual, daí a necessidade de reduzir o seu consumo. A energia elétrica não é exceção e portanto a nível mundial têm vindo a ser desenvolvidos esforços para um consumo mais eficiente.

Devido à massificação do MITG, e apesar de serem máquinas muito eficientes (comparativamente com os motores a combustão interna), percebe-se o porquê destes terem vindo a ser alvo de inúmeras medidas que visam o aumento da sua eficiência na sua utilização. Em aplicações onde o binário da carga varia com a velocidade do motor (p.ex. ventiladores, outras), a instalação de um variador eletrónico de velocidade (VEV) como *driver* do motor é a solução mais viável, atingindo poupanças bastante significativas. Existem outras onde a necessidade de variar a velocidade é imposta pela aplicação ou existe a necessidade de fazer

arranques e travagens controladas e até mesmo repetir várias vezes estas operações durante o ciclo de trabalho do motor, e assim mais uma vez o VEV é uma solução inquestionável.

Todavia, existem aplicações que trabalham a uma velocidade constante (esquecendo o escorregamento próprio do motor) mas com grande variação da carga ou até mesmo com motores sobredimensionados. Assim, sabendo-se à partida que o rendimento dos MITG decresce com a diminuição da carga imposta, facilmente se prova que estas aplicações apresentam uma eficiência ao nível do motor baixa. Ainda relativamente a aplicações de velocidade constante e carga variável a CAPIEL tem vindo a fazer chamadas de atenção para a não introdução do VEV como *driver* para a obtenção de poupanças elétricas. Nestes casos concretos este apresentam como melhor solução a ligação direta do MITG à rede.

Com a introdução do dispositivo proposto no mercado pretende-se apresentar uma solução para o aumento da eficiência do MITG instalado nestas aplicações. Por análise do capítulo 3 é possível perceber-se que a solução proposta se prende com o princípio do estrela-triângulo, utilizado até então para fazer o arranque suave dos motores em causa. Assim, a tecnologia apresentada neste trabalho de projeto pretende mudar o esquema típico do arranque estrela-triângulo e eliminar os problemas associados aos contactores eletromecânicos usados na implementação deste esquema. Deduz-se que por permitir substituir os tradicionais contactores e reduzir o número de condutores de alimentação do quadro ao motor, tipicamente utilizados no arranque estrela/triângulo, o custo de instalação estimado é inferior ao dos equipamentos que substitui/elimina, conduzindo a um tempo de retorno do investimento inferior ou praticamente imediato em novas instalações. Portanto, esta nova tecnologia apresenta-se como uma solução viável no que trata aos arranques suaves dos MITG.

Utilizando o princípio do estrela-triângulo em regime permanente, alterando o tipo de ligação dos enrolamentos estatóricos do MITG, em função da carga aplicada a este, afere-se o incremento do rendimento e fator de potência através dos testes teóricos implementados no simulador *PSIM*. No entanto, o modelo do MITG utilizado no *PSIM* apresenta um comportamento não linear (p. ex. não contempla as perdas no ferro em função do deslizamento, a saturação em função do tipo de ligação estrela ou triângulo), logo não se podem quantificar os incrementos mas sim concluir que eles existem e que dependem, como é óbvio, do nível de carga.

A implementação deste princípio através de eletrónica de potência nem sempre se revelou tarefa fácil, sobretudo quando se desconecta o dispositivo e o motor da rede através de um contactor principal ou um disjuntor motor. Evidencia-se que por manobrar MITGs de

potências médias, por se tratar de um dispositivo cujo objetivo se prende com a sua instalação dentro da caixa de terminais destes motores (local com uma temperatura ambiente elevada) e uma vez que a eletrónica de potência apresenta limites térmicos, desenhar um dispositivo com um tamanho reduzido, um *design* apelativo e uma instalação fácil foi um desafio interessante e até agora bem conseguido. Desta forma, o dispositivo proposto é até ao momento composto apenas e só pelos componentes necessários para atingir uma robustez e eficácia elevada, até porque com o aumento do número de componentes tende-se a diminuir a eficiência do dispositivo.

Implementada toda a eletrónica, torna-se crucial quantificar as poupanças inerentes à instalação do dispositivo proposto em MITGs de potências diferentes e classes de eficiência iguais.

Com os testes realizados conclui-se que as poupanças percentuais relativamente ao incremento do rendimento aumentam com o incremento da potência e as poupanças percentuais relativas ao incremento do fator de potência são menores. No que trata ao ponto de comutação este desloca-se para valores de carga mais baixos. Nos MITGs de potência igual e classe de eficiência diferente conclui-se que os ganhos de rendimento são menores com o aumento da classe de eficiência. Já o incremento do fator de potência é pouco superior ao do motor de classe de eficiência inferior. De ter em atenção que estes incrementos são apresentados em pontos percentuais não quantificando a redução do consumo de energia. De rematar que o aumento de rendimento e fator de potência levam a uma diminuição do consumo de energia por parte do MITG e por inerência a uma diminuição das perdas na cabelagem de toda a instalação, no transformador de entrada desta e uma diminuição dos custos adjacentes à compensação do consumo de energia reativa que se traduzem num TRI muito interessante ( $TRI < 2$  anos). Em alguns casos, esta tecnologia apresenta uma TRI virtualmente nula comparativamente com as tecnologias presentes no mercado, em novas instalações.





Por se tratar de um dispositivo com um mercado à escala global interessa quantificar este mesmo mercado. Assim, e porque permite fazer o arranque suave dos MITGs, olhou-se para o mercado para tentar perceber quais as soluções mais utilizadas e quantificar este mesmo mercado. Percebeu-se que os contactores eletromecânicos, por inerência ao arranque estrela-triângulo é a solução mais utilizada para fazer o arranque dos MITGs nas gamas de potências pequenas e médias. Tal facto traduz-se num bom sinal para a introdução deste dispositivo no mercado, até porque o princípio do estrela-triângulo está na base da conceção do mesmo. Era espectável, através da extrapolação de valores, definir de forma fácil e conclusiva o mercado potencial da tecnologia proposta. Porém, os dados oficiais contemplam gamas de potência muito grandes, daí que se tenha recorrido a um fabricante mundial de material elétrico para obter dados mais concretos. Este, de forma sigilosa e não oficial, forneceu esses mesmos dados mas ainda assim as gamas de potência são demasiado latas. Partindo de uma análise de dispersão e através de uma divisão proporcional do mercado foi possível extrapolar um mercado potencial de *retrofitting* e um mercado potencial de novas aplicações, sendo que as conclusões tiradas desta análise são de que o mercado inerente a este tipo de tecnologia, e só para fazer o arranque suave dos motores de indução trifásicos, é disruptivo.

Assumindo-se que os valores obtidos anteriormente, relativos ao mercado para a realização de arranques suaves, e que na União Europeia o fator de carga médio é de 60%, conclui-se que o mercado relativo às poupanças em regime permanente será igualmente muito grande, não se adiantando no entanto valores por ser um mercado sem valores oficiais de referência. É ainda expectável que este último mercado seja também ele grande uma vez que as poupanças em regime permanente se obtêm através de um princípio (estrela-triângulo) muito maduro e consensual no mercado.

Para a elaboração deste trabalho de projeto foi ainda elaborado um questionário e posteriormente apresentado a algumas empresas com renome no mercado nacional. Deste questionário conclui-se que este dispositivo, apesar de ainda não estar disponível no mercado, desperta já o interesse de muitos (pelo menos a quem foi apresentado), de tal forma que duas grandes empresas a quem se apresentou o questionário (Soporcel/Portucel e Cimpor) predispuseram-se a testar o dispositivo através da realização de projetos-piloto. Refira-se ainda que a tecnologia proposta foi sugerida pela EDP Serviços para o próximo PPEC. No último PPEC a sua inclusão foi adiada uma vez que o dispositivo ainda não estava disponível comercialmente e pela ausência de projetos-piloto certificados por uma entidade externa (p.

ex. ADENE), que comprovassem as poupanças obtidas. Estes factos constituem evidências inequívocas de interesse do mercado na solução proposta.

Por fim, convém realçar que o desenvolvimento deste projeto é participado pela EDP através do Prémio EDP Inovação 2013, prémio este que a tecnologia proposta ganhou.

Em suma, conclui-se com a elaboração do presente trabalho de projeto que a tecnologia apresentada faz todo o sentido no contexto dos dias de hoje, além de que o desenvolvimento deste dispositivo não tem só interesse a nível académico, sendo clara a necessidade que colmata se entrar no mercado.

## 7.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros e mais a nível técnico tem-se a criação de um estudo detalhado da componente térmica e a criação de um *datasheet* do dispositivo, onde no primeiro se pretende perceber se os 30 kW serão mesmo os limites térmicos para um dispositivo com as características do apresentado. Não se pretende portanto atingir uma gama de potências mais elevadas, alterando o conceito apresentado no presente trabalho de projeto. A elaboração de um *datasheet* relativo ao dispositivo tem por base a entrada do mesmo no mercado de forma breve. De salientar que uma evolução do dispositivo proposto para potências mais elevadas só é viável se o mercado potencial para gamas de potências acima dos 30 kW for tão interessante como o apresentado.

A curto prazo está-se a trabalhar para a realização dos primeiros testes pilotos que se pretendem que venham a corroborar todas as poupanças anteriormente apresentadas e permitam a certificação da tecnologia exposta.

No futuro pretende-se avaliar o mercado das aplicações de carga variável e velocidade constante com inversão do sentido de rotação e caso se justifique desenvolver *hardware* que permita a instalação do dispositivo proposto nestas mesmas aplicações. Esta evolução já se encontra pensada mas ainda não foi colocada em prática, daí que seja considerada um trabalho futuro.

Existem ainda outro tipo de motores onde a instalação deste tipo de dispositivo pode vir a ser muito interessante como é o caso dos motores de dupla velocidade (motores Dahlander). Uma vez que estes motores possuem duas velocidades é possível variar a velocidade (dois *steps*) e ainda otimizar o fluxo de magnetização nestas duas velocidades através do tipo de ligação (estrela-triângulo).

No caso concreto de motores com seis enrolamentos é possível criar vários níveis de fluxo de magnetização, permitindo criar vários *steps* de tensão com vista a otimização do rendimento e fator de potência destes motores. O desenvolvimento de *hardware*, a quantificação dos ganhos e a análise do mercado potencial será também um trabalho futuro com vista à evolução da tecnologia proposta.

Uma vez que nos dias que correm é cada vez mais comum usar-se motores de ímanes permanentes (LSPM), no futuro pretende-se estudar a instalação do dispositivo proposto com o intuito de fazer a compensação do fator de potência das instalações em regimes de carga baixa do motor.

Em suma, os trabalhos futuros prendem-se sobretudo com a entrada célere do dispositivo proposto no mercado, além de um dos objetivos passar também pela evolução do mesmo, com intuito de aumentar o mercado potencial. Convém referir que qualquer progresso do dispositivo terá sempre um pré-estudo com o objetivo de avaliar a viabilidade da evolução para uma possível entrada no mercado.



## REFERÊNCIAS

- [1] A. T. d. Almeida, F. J. T. E. Ferreira, J. A. C. Fong e C. U. Brunner, “Electric Motor Standards, Ecodesign and Global Market Transformation,” em *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, Clearwater Beach, FL, 2008.
- [2] H. H. Goh, M. S. Looi e B. C. Kok, “Comparison between Direct-On-Line, Star-Delta and Auto-transformer Induction Motor Starting Method in terms of Power Quality,” em *International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, Hong Kong, 2009.
- [3] F. J. T. E. Ferreira e A. T. d. Almeida, “Novel Multiflux Level, Three-Phase, Squirrel-Cage Induction Motor for Efficiency and Power Factor Maximization,” 2008.
- [4] WEG, “WEG,” 2014. [Online]. Available: <http://www.weg.net/files/photos-products/W22-B3T-All-Frames-RAL-6002-G.jpg>. [Acedido em 03 11 2014].
- [5] Rockwell Automation, “Rockwell Automation,” 1997. [Online]. Available: [https://www.rockwellautomation.com/resources/downloads/rockwellautomation/che/pdf/Basics\\_practical\\_operation\\_Motor\\_starting.pdf](https://www.rockwellautomation.com/resources/downloads/rockwellautomation/che/pdf/Basics_practical_operation_Motor_starting.pdf). [Acedido em 23 09 2014].
- [6] Eaton Corporation, “Eaton Industries GmbH,” 2010. [Online]. Available: <http://www.moeller.es/descarga.php?file=public/142/MSC.DS.MMAX.ver968en.pdf>. [Acedido em 23 09 2014].
- [7] CAPIEL, “European Coordinating Committee of Manufacturers of Electrical Switchgear and Controlgear Assemblies,” 11 2010. [Online]. Available: [http://www.capiel.eu/data/Journal\\_capiel-EN-BAT091110.pdf](http://www.capiel.eu/data/Journal_capiel-EN-BAT091110.pdf). [Acedido em 23 11 2014].
- [8] CAPIEL, “European Coordinating Committee of Manufacturers of Electrical Switchgear and Controlgear Assemblies,” 11 2010. [Online]. Available: [http://capiel.eu/data/Maquette\\_Capiel-V1.pdf](http://capiel.eu/data/Maquette_Capiel-V1.pdf). [Acedido em 23 09 2014].
- [9] CAPIEL, “European Coordinating Committee of Manufacturers of Electrical Switchgear and Controlgear Assemblies,” 04 2012. [Online]. Available:

- [http://www.capiel.eu/data/Journal\\_CAPIEL\\_MOTEUR-2\\_EN.pdf](http://www.capiel.eu/data/Journal_CAPIEL_MOTEUR-2_EN.pdf). [Acedido em 23 09 2013].
- [10] F. J. T. E. Ferreira, A. T. d. Almeida, G. Baoming, S. P. Faria e J. M. Marques, “Automatic Change of the Stator-Winding Connection of Variable-Load Three-Phase Induction Motors to Improve the Efficiency and Power Factor,” 2005.
- [11] Aníbal T. de Almeida, Fernando J. T. E. Ferreira, João Fong, Paula Fonseca, “EUP Lot 11 Motors,” 18 02 2008. [Online]. Available: [http://www.eup-network.de/fileadmin/user\\_upload/Produktgruppen/Lots/Final\\_Documents/Lot11\\_Motors\\_FinalReport.pdf](http://www.eup-network.de/fileadmin/user_upload/Produktgruppen/Lots/Final_Documents/Lot11_Motors_FinalReport.pdf). [Acedido em 20 09 2014].
- [12] ABB, “ABB,” ABB, 2014. [Online]. Available: [http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/1018a82e36b29462c1257d41002b3470/\\$file/TM025%20EN%2008-2014%20IEC60034-30-1\\_lowres.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/1018a82e36b29462c1257d41002b3470/$file/TM025%20EN%2008-2014%20IEC60034-30-1_lowres.pdf). [Acedido em 20 11 2014].
- [13] J. Montonen, V. Sizonenko, P. Lindh e J. Pyrhonen, “Energy efficiency of hoisting motors,” em *Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference on*, Berlin, 2014.
- [14] Anibal de Almeida, Hugh Falkner, Joao Fong, Fernando J. T. E. Ferreira, “EuP Lot 30: Electric Motors and Drivers,” 04 2014. [Online]. Available: [http://www.ebpg.bam.de/de/ebpg\\_medien/ener30/030\\_studyf\\_14-07.pdf](http://www.ebpg.bam.de/de/ebpg_medien/ener30/030_studyf_14-07.pdf). [Acedido em 29 11 2014].
- [15] J. E. Uliana, “Comando e motores elétricos,” 25 06 2013. [Online]. Available: <http://pt.slideshare.net/claudioarkan/apostila-de-comandos-eltricos-parte-2>. [Acedido em 03 12 2014].
- [16] J. F. d. S. Carvalho, Máquinas Assíncronas - Motores de Indução, Coimbra: ISEC, 2011.
- [17] A. Francisco, Motores Elétricos, Lisboa: Edições Técnicas e Profissionais, 2009.
- [18] F. A.E., J. Charles Kingsley e S. D. Umans, ELECTRIC MACHINERY, SIXTH EDITION, New York: McGraw-Hill Companies, Inc., 2003.
- [19] H. A. Toliyat e G. B. Kliman, Handbook of Electric Motors, Marcel Dekker, Inc., 2004.

- [20] Siemens, “Siemens,” 2014. [Online]. Available: [http://w3.siemens.com.br/automation/br/pt/PublishingImages/15489\\_20100105093337.jpg](http://w3.siemens.com.br/automation/br/pt/PublishingImages/15489_20100105093337.jpg). [Acedido em 10 2014].
- [21] ON Semiconductor, “ON Semiconductor,” 08 2008. [Online]. Available: [http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/AND8008-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND8008-D.PDF). [Acedido em 23 09 2013].
- [22] crydon, 2011. [Online]. Available: [http://www.crydom.com/en/Tech/Whitepapers/3P\\_MC\\_whitepaper.pdf](http://www.crydom.com/en/Tech/Whitepapers/3P_MC_whitepaper.pdf). [Acedido em 23 09 2014].
- [23] Practical Control Solutions, “Pratical Control Solutions,” 2013. [Online]. Available: <http://www.practicalcontrol.com.au/images/ssr/SA3.jpg>.
- [24] STMicroelectronics, “STMicroelectronics,” 03 2008. [Online]. Available: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application\\_note/CD00003865.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application_note/CD00003865.pdf). [Acedido em 25 05 2014].
- [25] ABB, “ABB Group,” 2010. [Online]. Available: [http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/e308f3e92d9a8fc5c1257c9f00349c99/20a5783a8b31d05748257c140019cc05/\\$FILE/Technical+note+TM008+low.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/e308f3e92d9a8fc5c1257c9f00349c99/20a5783a8b31d05748257c140019cc05/$FILE/Technical+note+TM008+low.pdf). [Acedido em 23 09 2014].
- [26] DGEG, Regras Técnicas das Instalações Elétricas de Baixa Tensão, Portugal: CERTIEL, 2006.
- [27] ABB, “ABB Group,” 07 2008. [Online]. Available: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/5e6a1c128ae4fab1c1257b490033f301/\\$file/1SDC007106G0201.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/5e6a1c128ae4fab1c1257b490033f301/$file/1SDC007106G0201.pdf). [Acedido em 23 09 2014].
- [28] PowerSines, 10 2009. [Online]. Available: [http://www.powersines.com/var/56/387256-sinuMEC\\_Web%20Oct09.pdf](http://www.powersines.com/var/56/387256-sinuMEC_Web%20Oct09.pdf). [Acedido em 23 09 2014].
- [29] Allegro, “Allegro MicroSystems, LLC,” 16 11 2012. [Online]. Available: <http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS712-Datasheet.ashx>. [Acedido em 10 06 2014].

- 
- [30] Semiconductor Components Industries, LLC, “ON Semiconductor,” 04 2014. [Online]. Available: <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/MC33201-D.PDF>. [Acedido em 15 08 2014].
- [31] STMicroelectronics, “STMicroelectronics,” 06 2013. [Online]. Available: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>. [Acedido em 01 08 2014].
- [32] STMicroelectronics, “STMicroelectronics,” 01 2014. [Online]. Available: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00100707.pdf>. [Acedido em 26 05 2014].
- [33] Universal Motors, “Universal Motors Catálogo de Produtos,” 2013. [Online]. Available: [http://www.universalmotors.pt/files/Cat\\_UM\\_2012\\_PT\\_ES\\_COMPLETO.pdf](http://www.universalmotors.pt/files/Cat_UM_2012_PT_ES_COMPLETO.pdf). [Acedido em 20 04 2014].
- [34] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, “ERSE,” 13 12 2013. [Online]. Available: [http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/2014/Documents/PrecosTVCF%20PTCont\\_2014.pdf](http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/2014/Documents/PrecosTVCF%20PTCont_2014.pdf). [Acedido em 11 17 2014].
- [35] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, “ERSE,” 29 07 2010. [Online]. Available: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/regulamentos/relacoescomerciais/Documents/Recomendações/Recomendação%20de%20energia%20reactiva.pdf>. [Acedido em 29 10 2014].
- [36] J. F. d. S. Carvalho, Máquinas Eléctricas - Transformadores, Coimbra: ISEC, 2011.
- [37] Fabricante Internacional de Equipamento Elétrico, “Confidencial,” 2005.
- [38] F. J. T. E. Ferreira e A. T. d. Almeida, “Large-Scale Downsizing of Induction Motors Requiring Stator Rewinding as a Low-Cost Strategy to Save Energy and Extend Motors Lifetime,” [Online]. Available: [http://www2.isr.uc.pt/~jeepisr/optisigma/optisigma\\_downsizing\\_paper.pdf](http://www2.isr.uc.pt/~jeepisr/optisigma/optisigma_downsizing_paper.pdf). [Acedido em 30 11 2014].



- 
- [39] International Energy Agency, “IEA Statistics,” 2014. [Online]. Available: <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=AFRICA&product=indicators&year=1995>. [Acedido em 10 2014].
- [40] ABB, “ABB GROUP,” 2014. [Online]. Available: [http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/1018a82e36b29462c1257d41002b3470/\\$file/TM025%20EN%2008-2014%20IEC60034-30-1\\_lowres.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/1018a82e36b29462c1257d41002b3470/$file/TM025%20EN%2008-2014%20IEC60034-30-1_lowres.pdf). [Acedido em 1 12 2014].